

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Є. І. Кучеренко, Д. Є. Краснокутський, І. С. Глушенкова

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНКИ**  
**ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**  
**ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ**

**МОНОГРАФІЯ**

Харків  
ХНАМГ, ХНУРЕ  
2011

УДК 519.715  
ББК 22.18  
К95

**Рецензенти:**

**О. Г. Гриб**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації енергосистем  
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

**А. Л. Єрохін**, доктор технічних наук, професор, начальник кафедри інформатики  
Харківського національного університету внутрішніх справ;

**О. Ю. Соколов**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики  
Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут».

*Рекомендовано до друку*

*Вченою Радою Харківського національного університету радіоелектроніки,  
протокол від 30.09.2009 № 55;*

*Вченою Радою Харківської національної академії міського господарства,  
протокол від 29.10.2010 № 2.*

**Кучеренко Є. І.**

К95 Теоретичні основи та технології оцінки технічного стану просторово  
розподілених об'єктів : монографія / Є. І. Кучеренко, Д. Є. Краснокутський,  
І. С. Глушенкова; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва, Харк. нац. ун-т  
радіоелектрон. – Х. : ХНАМГ, ХНУРЕ, 2011. – 167 с.  
ISBN 978-966-695-206-9

Наукова монографія містить нові результати наукових досліджень, авторські  
матеріали та відображує сучасний стан розвитку математичних моделей,  
інформаційних технологій та технологій обчислювального інтелекту.

Для спеціалістів в галузі моделювання, аналізу та проектування  
великомасштабних систем керування, обробки даних та знань у промисловості,  
бізнесі, енергетиці, екології з застосуванням моделей, методів та технологій  
обчислювального інтелекту, студентів та аспірантів спеціальностей напрямків  
комп'ютерних наук, програмної інженерії, комп'ютерної інженерії та управління,  
геоінформатики, суміжних спеціальностей.

**УДК 519.715  
ББК 22.18**

ISBN 978-966-695-206-9

© Кучеренко Є. І., Краснокутський Д. Є.,  
Глушенкова І. С., 2011  
© ХНУРЕ, ХНАМГ, 2011

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАНЬ ПОБУДОВИ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ АНАЛІЗУ І ОЦІНКИ СТАНІВ ПРОЦЕСІВ В СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТАХ, ЩО ФУНКЦІОНУЮТЬ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ....	8
1.1 Особливості функціонування складних об'єктів за умов невизначеності простору станів, процеси яких розподілені функціонально і просторово на рівнях ієрархії прийняття рішень .....	8
1.2 Методи та мережеві моделі аналізу стану складних об'єктів на основі інтелектуальних підходів і нечіткої логіки .....	10
1.3 Методи і моделі просторового аналізу стану процесів складних систем .....	16
1.4 Постановка задачі дослідження .....	20
Висновки до розділу 1 .....	22
2 ГІБРИДНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЇ РОЗШИРЕНЬ НЕЧІТКИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ .....	23
2.1 Побудова математичних моделей з використанням нечіткої логіки ...	24
2.2 Розвиток нечітких мережевих моделей на основі інтеграції розширень нечітких мереж Петрі і нейро-фаззі мереж .....	37
2.3 Розширення модифікованих гібридних математичних моделей складних систем .....	39
2.4 Елементи міжрівневих зв'язків нечіткої гібридної моделі .....	47
Висновки до розділу 2 .....	49
3 МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В НЕЧІТКОМУ ПРОСТОРІ СТАНІВ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЇ МЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ .....	51
3.1 Підходи до побудови методів аналізу процесів прийняття рішень в нечіткому просторі станів об'єктів на основі ієрархії мережевих моделей .....	51
3.2 Розробка критеріїв досяжності і несуперечності процесів прийняття рішень на нечітких мережевих моделях .....	55
3.3 Розробка методів аналізу досяжності та несуперечності процесів прийняття рішень на ієрархічних рівнях нечітких мережевих моделей ...	58
3.4 Підходи до побудови методів виявлення альтернатив на основі мережевих моделей в задачах аналізу стану складних технологічних об'єктів .....	64

3.5 Розробка методу вибору альтернатив в складних об'єктах на основі мережевих моделей .....	67
3.6 Розробка та дослідження алгоритму аналізу нечітких процесів мережевими моделями на основі ієрархії класів нейро-фаззі мереж Петрі .....	71
Висновки до розділу 3 .....	79
4 ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕТОДИ НАСТРОЮВАННЯ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ В ЗНАННЯОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ .....	81
4.1 Прикладні аспекти моделювання нечітких процесів в складних системах .....	81
4.2 Бінарні методи настроювання функцій належності в нечітких системах .....	91
4.3 Розвиток методів настроювання функцій належності з використанням нечіткої інтервальної багатозначної логіки .....	102
4.4 Інформаційні технології оцінювання станів територій в ГІС за умов невизначеності .....	110
Висновки до розділу 4 .....	116
5 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОЦІНЮВАННЯ СТАНІВ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ .....	118
5.1 Інформаційні технології аналізу процесів оцінювання простору станів складних технологічних об'єктів на основі запропонованих нових методів і моделей .....	118
5.2 Структура і функції програмних засобів аналізу і оцінки технічного стану складних технологічних об'єктів .....	123
5.3 Інформаційні технології розв'язання прикладних задач аналізу і оцінювання станів просторово розподілених складних об'єктів .....	131
Висновки до розділу 5 .....	147
Висновки за результатами наукових досліджень .....	149
Список використаних джерел .....	153

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку теоретичних і прикладних досліджень значна увага приділяється проблемі підвищення ефективності і надійності функціонування складних технологічних об'єктів. Це значною мірою стосується об'єктів промислової і енергетичної сфери, які реалізують задачі розподіленого і ієрархічного управління в умовах невизначеності з використанням ідей і методів штучного інтелекту. Важливою складовою створення таких систем є розв'язання задач аналізу адекватності взаємодії процесів за критеріями, які визначаються предметною областю, оцінкою простору станів з достовірністю, яка забезпечить комплексне формування дій для стійкого функціонування об'єкта.

**Актуальність роботи.** Аналіз світового досвіду дає нам право стверджувати, що нині значна кількість досліджень орієнтована на детерміновані або стохастичні процеси, що часто повною мірою не дозволяє адекватно відображати їх суть. Значним кроком до успішного розв'язання такого класу задач є використання і моделювання нечітких даних і знань, нечіткого логічного виведення. Застосування лінгвістичних змінних та їх нечітких значень дозволяє формалізувати широке коло задач, використовуючи, до того ж, мову, більш близьку до природної.

У зв'язку з цим досить актуальною є задача розробки теоретичних основ, нових методів і моделей процесів аналізу і оцінки простору станів об'єктів з використанням нечіткої логіки і нечітких знань експертів-фахівців в даній галузі, що дозволяє розробити і реалізувати ряд формальних критеріїв, які мають високі показники достовірності.

Наукові дослідження виконано в межах держбюджетної теми Харківського національного університету радіоелектроніки № 245 «Еволюційні гібридні системи обчислювального інтелекту за змінною структурою для інтелектуального аналізу даних» (№ ДР 0110U000458) та в рамках держбюджетної теми Харківської національної академії міського господарства

«Розробка теоретичних основ моделювання динаміки розвитку міських систем з застосуванням ГІС-технологій і методів дистанційного зондування Землі» (№ ДР 0108U006506).

Було розроблено і обґрунтовано: нові мережеві математичні моделі процесів аналізу простору станів складних об'єктів, які базуються на нечіткій логіці, ієрархії розширеної кольорової інтегрованої нечіткої мережі Петрі; нові методи аналізу простору станів і вияву властивостей досяжності, несуперечності та вибору альтернатив в складних об'єктах при взаємодії нечітких ієрархічних процесів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є створення нових, науково обґрунтованих методів і мережевої математичної моделі на основі нечіткої логіки для аналізу і оцінки станів складних об'єктів, процеси в яких носять ієрархічний характер, визначені на множині відношень «умова–дія», і дозволяють підвищити ефективність і надійність їх функціонування.

Відповідно до поставленої мети, в наукових дослідженнях вирішуються такі задачі:

1. Аналітичний огляд проблеми аналізу станів складних об'єктів, процеси в яких подані на ієрархічних рівнях на множині відношень «умова–дія».

2. Розробка мережевої математичної моделі процесів аналізу простору станів складних об'єктів, поданих на множині відношень «умова–дія», які ґрунтуються на нечіткій логіці, ієрархії розширених інтегрованих нечітких мережах Петрі, що мають засоби управління взаємодією ієрархічних рівнів.

3. Розробка методу аналізу простору станів і виявлення властивостей досяжності і несуперечності при взаємодії нечітких ієрархічних процесів, які засновані на нових критеріях вияву вказаних неадекватностей.

4. Розробка методу аналізу простору станів при взаємодії процесів у задачах вибору альтернатив складних об'єктів з використанням нечіткої математичної моделі, моделі нечіткої бази знань і просторової моделі.

5. Розвиток методів настроювання функцій належності з використанням нечіткої інтервальної багатозначної логіки.

6. Розробка структури і функцій інструментальних засобів розв’язання практичних задач.

Розроблені і обгрунтовані нові методи і мережева модель є теоретичною базою розв’язання задач моделювання, оперативного аналізу і оцінки простору станів складних об’єктів з метою вияву, локалізації та усунення неадекватностей в технічному стані технологічних об’єктів. Запропоновано та обгрунтовано: алгоритмічні засоби аналізу нечітких процесів на основі нової мережевої моделі і методів, які є розширенням алгоритму побудови дерева досяжності на мережах Петрі; структура і функції інструментальних засобів вирішення прикладних задач аналізу простору станів складних технологічних об’єктів і підтримки прийняття рішень. Ефективність теоретичних і практичних положень роботи підтверджена впровадженнями на реальному об’єкті відповідно до господарської договірної теми між ВАТ «Харківгаз» і Харківським національним університетом радіоелектроніки.

Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в роботі, використано у навчальному процесі при підготовці спеціалістів та магістрів кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки та кафедри геоінформаційних систем та геодезії Харківської національної академії міського господарства.

## РОЗДІЛ 1

### **АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАНЬ ПОБУДОВИ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ АНАЛІЗУ І ОЦІНКИ СТАНІВ ПРОЦЕСІВ В СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТАХ, ЩО ФУНКЦІОНУЮТЬ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

1.1 Особливості функціонування складних об'єктів за умов невизначеності простору станів, процеси яких розподілені функціонально і просторово на рівнях ієрархії прийняття рішень

Проблеми підвищення якості систем обробки даних і управління складними технологічними об'єктами, які функціонують за умов невизначеності, завжди були важливими і актуальними [1, 2, 3, 4]. Подальший розвиток динамічних систем, а також сучасних комп'ютерних засобів визначив актуальність для теорії і практики щодо простору станів об'єктів і процесів. При цьому оптимально поєднується суворість формалізму, наглядність і доступність рішень, що приймаються. Розв'язання комплексу задач, що вирішуються в різних галузях людської діяльності, розширення функціональних можливостей систем потребує зваженого підходу до варіантів їх реалізації [5]. Однак застосування принципу складності не означає «загрублення» технічних рішень. У зв'язку з цим, вказуючи на системність рішень, автор роботи [2] цілком слушно процитував Рассела А. Аккоффа: *«Треба перестати поступати так, немов природа поділяється на дисципліни, як в університетах...»*.

Сучасні складні територіально і функціонально розподілені технологічні об'єкти функціонують в умовах жорстких обмежень на ресурси, невизначеності, яка виникає внаслідок нечіткості, неточності, стохастичності процесів управління і прийняття рішень. Проблеми нечіткості одним з перших досліджував Л. Заде [6] в задачах подання процесів, що не цілком (в значенні «класичної математики») формалізуються. Такий підхід знайшов розвиток в різних областях людської діяльності [7, 8, 9].



Наявність в реальних об'єктах властивостей розподіленості [10] і ієрархічності [11], а також потреба коректного їх відображення в системах обробки даних і управління [12, 13], призвела до необхідності подальшого розвитку теорії і практики моделювання, аналізу і оцінки технічного стану таких процесів і об'єктів.

Як відомо, наявність властивостей розподіленості [10] процесів призводить до необхідності вияву принаймні таких властивостей:

- досяжність в процесах прийняття рішень. Як похідна властивостей досяжності часто розглядається задача аналізу, локалізації і усунення статичних і динамічних безвихідних ситуацій;

- конфліктних ситуацій, які зазвичай призводили до зниження продуктивності і пропускну здатності, а часто і до відмови систем.

Ці задачі досить глибоко і ґрунтовно досліджені вченими наприкінці минулого століття в зв'язку з розвитком розподілених і мережових структур управління і обробки даних. Не претендуючи на повноту, деякі аспекти вказаних проблем були реалізовані вже в той час у ряді мережових протоколів та їх реалізацій [10].

У більшості випадків проблеми розподіленості [10] і ієрархічності [11] в складних системах істотно пересікаються [12, 13] і при невдалому їх вирішенні можуть призвести до негативних наслідків для об'єктів і систем в практичних реалізаціях.

До головних проблем, які виникають в ієрархічних системах [11] і при моделюванні таких процесів і систем, в більшості досліджень належать такі:

- послідовне вертикальне розташування підсистем, що складають систему (вертикальна декомпозиція);

- пріоритет дій або право втручання підсистем верхнього рівня (координація);

- залежність дій підсистем верхнього рівня від задач фактичного виконання підсистем нижніх рівнів своїх функцій (принцип координації).

У роботі [11] введено три рівні опису: *страти* визначають рівень опису або абстрагування; *шари* визначають рівні складності рішень, що приймаються; *ешелони* визначають організаційний або структурний рівень. Найважливішим принципом в ієрархічних системах та моделях є принцип координації, який включає як правило два аспекти: аспект самоорганізації, який характеризує зміну структури; аспект управління, який характеризує координуюче втручання при фіксованій структурі. Ці положення ми і будемо враховувати надалі. Істотним обмеженням положень робіт [10, 11] є відсутність врахування таких важливих властивостей, як нечіткість процесів і технологій [6, 7, 8, 14, 15], коли враховуються нечіткі дані та знання про предметну область. Перевагою таких підходів є також можливість використання «знання орієнтованих технологій», оцінки стану об'єктів і процесів в умовах невизначеності, при відсутності достовірної апіорної інформації і статистичних виборок про особливості процесів, що розглядаються. Це розумів і авторський колектив на чолі з М. Месаровичем [11], коли вказував на труднощі, пов'язані з урахуванням «розпливчатості» критеріїв «порядок величини» і «інтенсивність і тип взаємодії». Зрозуміло, що розв'язання вказаних труднощів переважно лежить у площині нечітких постановок і рішень [6, 7, 8].

Вирішення деяких із вказаних аспектів і будуть представляти мету даної роботи.

## 1.2 Методи та мережеві моделі аналізу стану складних об'єктів на основі інтелектуальних підходів і нечіткої логіки

Інтелектуальні підходи до аналізу і обробки даних про стан об'єктів різної складності є досить ефективними і широко застосовуються.

Важливою особливістю мережевих моделей є те, що вони забезпечують обробку різнорідних взаємодіючих процесів, які представляють дані і знання в нечіткому просторі станів об'єктів аналізу. Нечіткі моделі орієнтовані на моделювання структур, де справедливо [16]:

- функціонування на рівні лінгвістичних термів (нечітких множин);

- характеристики системи можуть бути зображені в тому ж самому лінгвістичному форматі;
- уявлення і обробка даних та знань за умов невизначеності процесів і їх відношень.

Тоді деяка система може бути представлена набором нечітких моделей [16], що відображають її деталізацію, яка використовується для представлення зв'язку модельного простору зі середовищем моделювання. Міра деталізації лінгвістичних уявлень (маркерів) означає об'єкт досліджень, а логіка лінгвістичного представлення процесів описується рівнем логічно-орієнтованих відношень.

Справедливість підходу очевидна, однак вона не передбачає реалізацію окремих моделей представлення середовищ на різних ієрархічних рівнях [11] з єдиною базою та єдиним математичним апаратом.

У роботі [17] розглядаються питання застосування гібридних нейро-фаззі (нечітких) моделей, систем і структур для організації аналізу технічного стану об'єктів. Вирішується важлива задача планування аналізу процесів, яка може автоматично генерувати ефективно та послідовно інспекційні плани. Інтелектуальна система інтегрує інформацію про геометрію частини, інформацію про допуск і евристичні знання експертів, фахівців для того, щоб визначити відповідні числа та позиції точок вимірювання.

Система отримує інформацію про об'єкт від користувачів та зберігає її в загальній базі даних з тривимірним простором. Ряд нечітких правил та функцій належності автоматично витягується з попередніх вивчених даних, використовуючи гібридний нейро-фаззі метод. Після того, як нечіткі правила сгенеровано гібридною нейро-фаззі моделлю, застосовується генетичний алгоритм для того, щоб оптимізувати параметри ваги та знайти оптимальні значення для констант. Запропонована інтелектуальна система планування огляду надає стійкий та послідовний план, видаляючи суб'єктивність людського фактору. Однак вузькість постановок не дозволяє повною мірою оцінити переваги дослідження.

У [18] розглянута модель і інтегрована експертна система (FPNES), яка призначена для оцінок стану і можливих пошкоджень моста. Основні функції системи FPNES включають: логічне виведення для нечіткої та неточної інформації; представлення знань за допомогою ієрархічних нечітких мереж Петрі; механізм логічного виведення, заснований на нечітких мережах Петрі; механізм пояснень результатів логічного виведення за допомогою ієрархічних нечітких мереж Петрі. Засоби FPNES мають ряд важливих переваг: надання механізму для невизначеної і нечіткої інформації; поліпшення переваг правил за рахунок паралелізму при активізації правила; пояснення процедур нечіткого логічного виведення на нечітких мережах Петрі. Прикладання до оцінки стану та аналізу процесів і пошкодження моста Da-Shi в Тайвані є хорошим підтвердженням підходу, що пропонується.

Існуючі проблеми оцінки рівня навчання фахівця є важливими, вони, як відзначено в роботі [19], можуть бути вирішені на основі нейро-фаззі технологій. У роботі розглянуто емпіричний підхід, який дозволяє використати нейро-фаззі синергізми для оцінки рівня навчання фахівця в контексті інтелектуальних систем навчання. Таким чином, генерується модель об'єкта, яка дозволяє оцінювати інформацію про рівень знань і когнітивних здібностей в різних областях. Нейро-фаззі моделі були протестовані на прототипі системи навчання в області фізики проектування вертикальних рухів та отримані нові результати, які на думку авторів досліджень, виявилися вельми задовільними. Вузкість підходу і поверхневий виклад не дозволяють достатньою мірою оцінити розробку та їх можливі застосування.

Необхідно відзначити перспективність для аналізу систем гібридних нейро-фаззі і геоінформційних технологій [20]. Заснований на географічній інформаційній системі (ГІС), гібридний нейро-фаззі підхід [20] на аналізі стану об'єкта та логічному виведенні Takagi-Sugeno, приводить нечітку систему виведення до чотирьох (багаторівневих) адаптивних нейронних мереж з прямим зв'язком. У цьому підході кожну єдину комбінацію шаблонів прогнозуючого об'єкта вважають характеристичним вектором, компоненти

якого отримані інтелектуальним порядковим кодуванням прогнозуючого об'єкта.

Проблеми розробки принципів та створення біокомпонентів комп'ютерів в цей час стають актуальними, що пов'язано з великою обчислювальною складністю і низькою швидкістю при вирішенні задач великої і дуже великої розмірності. У роботі [21] розглядаються деякі часткові питання, зокрема, метод експлуатації гібридної мережі Петрі (HPN) для задач моделювання генів регулюючих мереж. HPN – це розширення мереж Петрі, що використовуються для того, щоб представити множину видів систем, що включають стохастичність в області інформатики і інженерії. Оскільки у HPN є безперервні і дискретні елементи, вона може легко зв'язуватися з біологічними та іншими складними процесами. У роботі демонструється, що при використанні HPN можливо перевести біологічні факти на HPN природним способом. Підкреслюється, що ієрархічний підхід застосований для отримання генетичного механізму вимикання так званих фаз, який утвориться при використанні HPN. Цей ієрархічний підхід з HPN робить простішим узагальнення компонентів регулюючої мережі, заснованої на біологічних фактах.

Регулювання та моделювання [22] процесів людського організму, як складної біологічної системи з численними взаємозалежними процесами є досить актуальним, що вимагає застосування адекватних моделей, глибоких теоретичних та практичних досліджень. Біологічні структури можуть самовідновлюватися, щоб підтримати процеси функціонування. У роботі вся увага зосереджена на використанні гібридних функціональних мереж Петрі, яким властива гнучкість. Для того, щоб отримати потрібний результат, в даній роботі моделюється роль визначених компонент процесів, які беруть участь в регулюванні раннього гомеопоезу (Haematopoiesis).

Цікавий підхід пропонується в роботі [23], коли гібридна модель розглядається як сукупність безперервної і дискретної складових. Мережі Петрі (PN) широко використовуються, в моделюванні технічних систем (комп'ютерні системи, виробничі системи, системи зв'язку, і т.д) [23]. Безперервні мережі

Петрі з безперервними маркіруваннями були визначені зовсім недавно. Наприклад, такий підхід може моделювати систему безперервної дії або апроксимувати дискретну систему. Гібридна мережа Петрі може бути отримана, якщо одна з частин дискретна, а інша частина є безперервною. Робота орієнтована на аналіз і вирішення переважно конфліктів в гібридних системах.

У ряді робіт увага дослідників приділяється проблемі гібридизації систем, моделей та технологій. У дослідженнях, що аналізуються, пропонується об'єднання штучної нейронної мережі і мережі Петрі в формальній моделі інтелектуальних мереж Петрі [24]. Потрібно зазначити, що підхід не новий. Існують підходи, які за деякими показниками мають переваги. Запропонована модель, на думку авторів, не тільки описує переваги мереж Петрі, але також включає нейрони, що дозволяє в повній мірі використати переваги штучних нейронних мереж. Це відповідає динамічним процесам інформаційних систем, коли синаптичні ваги коригуються. Для випробування моделі були розглянуті і змодельовані процеси постачання виробів обробки промисловості. Підтверджено ефективність запропонованого підходу.

Нечіткі моделі мереж Петрі (FPN), які представлені в роботі [25] для вивчення формування нечітких правил, що відносяться до системи, в якій генерація нечітких правил описує правила нечітких відношень між двома пропозиціями. Підхід має важливі перспективи.

Відомо, що найбільш дослідженим, і напевно ефективним підходом до побудови баз знань є модель, що заснована на правилах продукцій та має вигляд *if / then* [16, 26, 27]. Засновані на нечітких правилах рішення [16], які приймаються, є ефективним засобом подання взаємодіючих динамічних процесів, що відображають дані і знання.

У загальному вигляді під продукцією розуміють [26, 27] вираз такого вигляду:

$$(i): Q, P, A \rightarrow B, N ,$$

де  $i$  – ім'я продукції. Як ім'я може виступати також порядковий номер.

Елемент  $Q$  характеризує сферу застосування продукцій. Важливою складовою продукцій є їх ядро –  $A \rightarrow B$ , яке в загальному випадку містить *if / then* структури.

У конструкціях ядра складова  $A$  характеризується складною структурою, що може включати також деякі предикати, логічні оператори типу *and, or, not* та їх похідні.

Компонента  $P$  визначає умову застосування ядра продукції, яка часто може бути представлена також деяким предикатом.

Компонента  $N$  визначає постумову продукції і звичайно актуалізується при виконанні правила.

Таким чином, при розгляді моделей, заснованих на правилах продукцій, що відображають знання, представляють інтерес такі фундаментальні аспекти:

- надбання і формалізація знань;
- алгоритми аналізу властивостей адекватності надбаних знань;
- розробка і використання ефективних алгоритмів нечіткого логічного виведення, які забезпечують прийняття достовірних рішень на нечітких правилах.

Щорічно в світі проходить багато конференцій, симпозіумів, форумів, які значною мірою висвітлюють питання використання мережевих моделей на основі нечіткої логіки для моделювання, аналізу і управління взаємодіючими процесами в технічних системах. Так в роботі [28] пропонуються інструментальні засоби для моделювання і дослідження моніторингу систем дискретної дії. Такі процеси функціонують за умов невизначеності, відсутності або неточності даних і знань. У цьому випадку модель приводить до певного міркування з подальшою адаптацією на основі фаззі-логічного моделювання логічних структур, що пропонуються в дослідженнях. Для цієї мети запропонована і обґрунтована так звана фаззі-логічна мережа Петрі (FRPN). На

жаль у роботі відсутні будь-які дані про ефективність моделі і моделювання процесів.

Сучасні підходи до моделювання складних взаємодіючих процесів і об'єктів вимагають адекватного відображення нечітких процесів на моделі. Існує ряд повідомлень про результати застосування різних стратегій і алгоритмів до навчання нечітких мереж Петрі. У роботі [29] представлено схему навчання з вчителем на фаззі мережах Петрі, яка багато в чому аналогічна схемам навчання штучних нейронних мереж. Ефективність підходу невідома.

У роботі [30] представлені деякі результати і фаззі підходи для моделювання і аналізу процесів, представлених у дискретному вигляді. Для цих цілей автори запропонували інструментальні засоби моделювання і аналізу дискретних процесів, заснованих на фаззі мережах Петрі. Як впливає з матеріалів повідомлення, засоби орієнтовані тільки на можливості програмного середовища Matlab, що звужує перспективи використання запропонованого ними підходу.

Потрібно зазначити, що в ряді робіт [29, 31 - 34] отримано ряд важливих результатів, які опубліковані відомими вченими в даній області знань і практичних прикладань. Однак відсутність механізму аналізу в явному вигляді як властивостей розподіленості, так і ієрархічності процесів у взаємодії, а також просторової компоненти не дозволяють їх використати в повній мірі для вирішення задач, що розглядаються в даній роботі.

### **1.3 Методи і моделі просторового аналізу стану процесів складних систем**

Для уявлення просторово та функціонально розподілених систем та об'єктів, до яких насамперед віднесемо об'єкти електроенергетики, нафтові, газово-транспортні магістралі [35, 36], вимагає застосування засобів достовірного, простого і наочного відображення їх стану, всіх їх особливостей



та властивостей. Це надзвичайно важливо для нашої високорозвиненої промисловості. По території України проходить значна кількість одних з самих великих в світі транспортних магістралей. Як приклад можна навести множину щільності газотранспортних магістралей (рис. 1.1) [36].

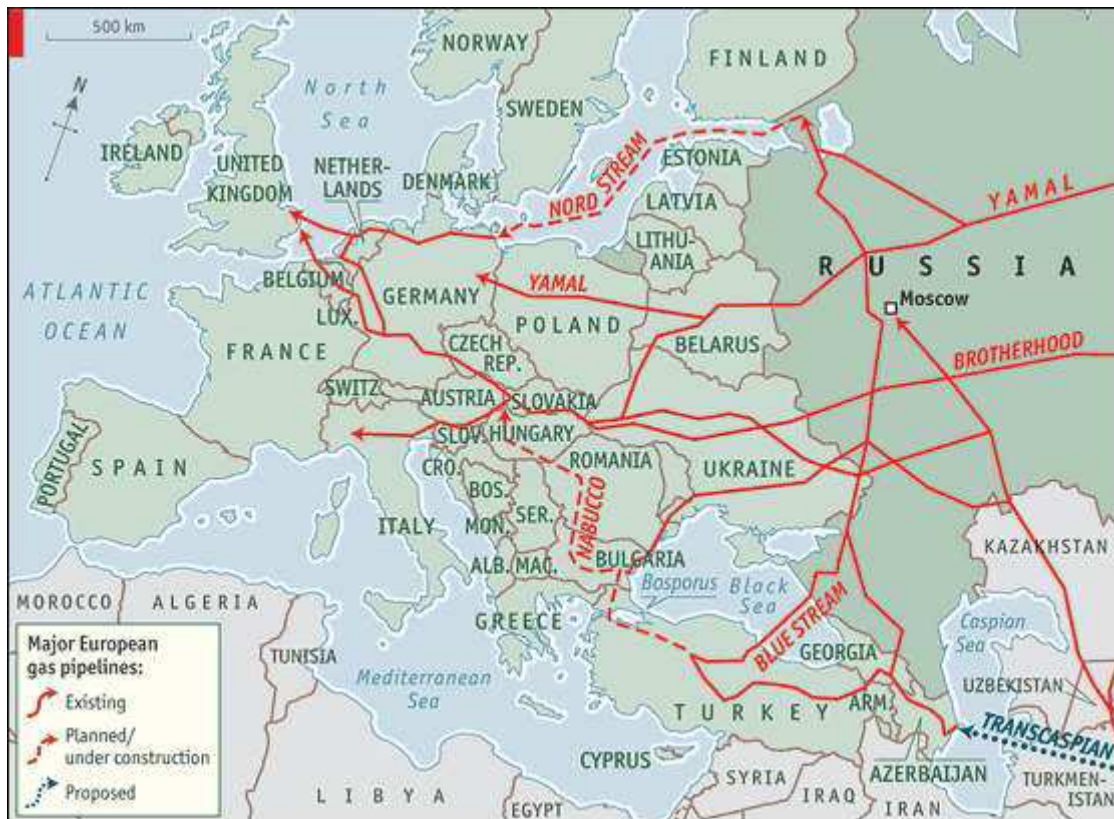


Рис. 1.1 – Газотранспортні магістралі «схід-захід» територією України

Швидкий розвиток комп'ютерних технологій викликав зміни в пріоритетах відображення об'єктів на основі інтеграції традиційних підходів та геоінформатики [37, 38]. Інструментарієм реалізації положень і ідей геоінформатики є географічні інформаційні системи (ГІС), де визначене використання сучасних об'єктно-орієнтованих інформаційних технологій і технологій дистанційного зондування Землі для опису просторово розподілених об'єктів.

Для дослідження і моделювання таких специфічних об'єктів використовуються такі моделі: цифрова просторова модель організації

геопросторових даних; інформаційна модель; математичні моделі зображення (знаково-графічні, електронно-графічні, фотографічні і т.п.) [37, 38].

Методи географічного моделювання геосистеми та їх компонентів включають моделювання структури, динаміки, взаємозв'язку, функціонування системи в просторі і часі. Багато з методів моделювання знайшли своє продовження і розвиток у технологіях ГІС-аналізу [38, 39]. Основною компонентою моделювання є цифрова модель місцевості, яку можна отримати за допомогою сучасних технологій. Неодмінною умовою сприйняття цифрової карти є візуалізація закодованого в ній картографічного зображення шляхом відображення її змісту на відеоекрані.

Розрізняють такі види інформаційних моделей: інформаційно описові, інформаційно ресурсні, інтелектуальні [38, 40]. До інформаційно *описового* (дескриптивного) класу відносять модель, побудовану як опис деякого процесу, явища, об'єкта, їх суті. Прикладом такої моделі є файл, текстовий документ тощо.

*Інформаційно-ресурсна* модель здатна акумулювати дані для свого поліпшення і оптимізації (модель бази даних, людська пам'ять).

*Інтелектуальна модель* – це клас моделей, спрямованих на накопичення інформації, самовдосконалення і здійснення дій на основі знання орієнтованих технологій, застосування нечіткої логіки, розпізнавання образів. Часто інформаційні моделі засновуються на вказаних вище математичних моделях зображення.

Таким чином, геоінформативне моделювання – це засіб моделювання, який можна віднести до класу моделювання графічних об'єктів, взаємопов'язаних з моделями баз даних і баз знань, що істотно розширюють функції моделювання просторово розподілених об'єктів.

Хороший приклад, що визначає можливості просторового моделювання в ГІС і комунікаціях, що проектуються, наведено в роботі [41]. При виборі варіантів трас, що проектуються, вирішується цілий ряд типових задач, пов'язаних з детальною оцінкою фізико-географічних, ландшафтних, інженерно

геологічних та інших умов території, що досліджується. До таких задач належать: визначення реальної довжини траси з урахуванням рельєфу; підрахунок і класифікація перетинів траси з об'єктами гідрографії, дорожньої мережі і т.д.; оцінка віддаленості кожної ділянки майбутнього будівництва від транспортних комунікацій і населених пунктів; облік оцінки будівництва у залежності від геологічної будови і покриття землі (піски, болота, виходи корінних порід і т.д.), а також багато іншого, що вимагає кропіткого зіставлення просторового положення різних об'єктів території досліджень.

Складність і трудомісткість таких процесів очевидна, що і вимагає застосування для даних робіт засобів ГІС і їх інтелектуалізації [42 - 43]. Так в роботі [43] розглянуті проблеми інтелектуалізації на основі інтеграції ГІС, баз знань і нечітких (м'яких) обчислень. Варіант реалізації такої системи запропонований на рис. 1.2 [43].

Проблемам моделювання нечітких просторових даних складних просторово-розподілених об'єктів, що представляють географічні утворення і відношення, присвячена робота [44]. За даними авторів [44], поставлена проблема є досить складною та багатоаспектною. Розв'язання проблеми можна представити як сукупність існуючих підходів [45–48] до створення моделей, моделювання на основі інтелектуальних засобів прийняття рішень, формування запитів даних про процеси і відношень просторово-нечітких складних об'єктів. У дослідженні пропонується формування метеорологічних даних на основі прикладань інтелектуальних підходів, які поєднують об'єктно-орієнтовані бази даних і знання для моделювання і запитів просторово-розподілених об'єктів.

Аналіз наведених робіт показав важливість і перспективність досліджень на основі моделей, що використовують нечітку логіку і знання орієнтовані технології.



Рис. 1.2 – Структурна схема інтелектуальної системи збору, підготовки і транспортування вуглецево-водневої сировини

#### 1.4 Постановка задачі дослідження

На основі аналітичного огляду існуючих рішень в області моделювання і аналізу стану складних об'єктів, процесів і їх взаємодії, що мають ієрархічний характер, є нечіткими на множині відношень «умова–дія» зроблено висновок, що такі процеси мало досліджені, відомі рішення, як правило, не доведено до практичних реалізацій. Це визначає актуальність очікуваних рішень, визначає перспективність теоретичних і практичних досліджень.

Сформулюємо постановку задачі, яка становить суть даних досліджень, як розв'язання актуальних теоретичних і практичних задач моделювання, аналізу і оцінки простору станів складних технічних об'єктів, процеси і взаємодія яких є нечіткими, носять ієрархічний характер та вимагають при функціонуванні засобів синхронізації, механізмів управління міжрівневими взаємодіями, представлені на множині відношень «умова–дія».

Нехай існує множина нечітких процесів

$$\{PR_i^{(S)}\}, \quad i \in I. \quad (1.1)$$

Процеси (1.1) при їх цілеспрямованій взаємодії на множині декартового добутку

$$\{PR_k^{(S)}\} \times \{PR_l^{(S)}\} \times \dots \times \{PR_u^{(S)}\}, \quad (1.2)$$
$$k \in K, \quad l \in L, \quad u \in U, \quad K \subset I, \quad L \subset I, \quad U \subset I,$$

причому, в загальному випадку, для (1.2) справедливо

$$K \cap L \cap U \neq \emptyset \quad (1.3)$$

реалізують деякий комплекс взаємно залежних задач. Задачі визначені в деякому просторі станів відповідно до логіки функціонування складного об'єкту.

Процеси (1.1) можуть бути синхронізованими, визначеними в детермінованому, ймовірнісному та нечіткому просторах станів, розвиватися в просторі й часі.

Необхідно, як теоретичну базу моделювання, аналізу і оцінки стану технічних об'єктів:

- розробити мережеві математичні моделі  $\{\tilde{S}^{(M)}_C(f)_\alpha\}, \alpha \in A$  процесів аналізу простору станів складних об'єктів, представлених на множині відношень «умова–дія», які засновані на нечіткій логіці, ієрархії розширених мереж Петрі та мають засоби управління взаємодією ієрархічних рівнів;

- на основі мережевих математичних моделей  $\{\tilde{S}^{(M)}_C(f)_\alpha\}, \alpha \in A$  запропонувати механізми взаємодії ієрархічних рівнів, які адекватно відображають найбільш характерні взаємодії рівнів процесів об'єктів предметних областей;

- на основі мережевих математичних моделей  $\{\tilde{S}^{(M)}_C(f)_\alpha\}, \alpha \in A$  розробити критерії і методи аналізу простору станів і вияву властивостей досяжності  $Rch(S) = true$  цілей рішень, що приймаються, і несуперечності  $\overline{Cont}(S) = true$  при взаємодії нечітких ієрархічних процесів;

- на основі мережевих математичних моделей  $\{\tilde{S}^{(M)}_C(f)_\alpha\}, \alpha \in A$  розробити критерії і методи аналізу простору станів при взаємодії процесів в задачах вибору альтернатив  $\{Alt_w\}, w \in W$ .

З використанням теоретичних положень даних досліджень необхідно розробити і обґрунтувати структуру і функції інструментальних засобів рішення практичних задач.

## **Висновки до розділу 1**

1. Виконано аналітичний огляд стану питання і особливостей побудови методів і моделей аналізу і оцінки стану процесів в складних розподілених системах, що функціонують в умовах невизначеності.

2. Визначено, що процеси й об'єкти розподілені в просторі, можуть мати ієрархічний характер, функціонувати в нечіткому просторі станів. Розглянуті особливості функціонування складних об'єктів в умовах невизначеності, процеси яких розподілені функціонально і просторово на рівнях ієрархії прийняття рішень.

3. Визначена перспективність розробки і розширення методів аналізу і моделювання простору станів складних об'єктів на основі мережевих математичних моделей, що використовує нечітку логіку та відображає в явному вигляді просторову компоненту.

4. На основі проведеного аналітичного огляду по суті досліджень сформульована постановка задачі досліджень, направлених на рішення комплексу взаємопов'язаних теоретичних і практичних питань аналізу й оцінки технічного стану складних ієрархічних просторово розподілених об'єктів.

## РОЗДІЛ 2

### ГІБРИДНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЇ РОЗШИРЕНЬ НЕЧІТКИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Ряд важливих об'єктів промислового призначення функціонують в умовах апіорної невизначеності, характеризуються нечітким простором станів, що вимагає нових інтелектуальних підходів для підвищення достовірності рішень, що приймаються. Потрібно також зазначити, що сучасні об'єкти часто характеризуються функціональною та територіальною розподіленістю [10], складною ієрархією взаємодії їх компонент [11]. Це ставить досить високі вимоги до математичного апарату й ефективності методів моделювання і аналізу процесів предметної області.

Існуючі підходи до побудови та аналізу систем управління та обробки даних в таких умовах [12, 13] звичайно малоефективні через їх функціональну обмеженість, а в ряді випадків вони не дають практичних підходів до рішення поставлених задач. Перспективним апаратом побудови систем є застосування нечіткої логіки Л. Заде, а для моделювання і аналізу складних процесів при вирішенні комплексу поставлених задач доцільним є використання апарату мереж Петрі (СП) [49] та його розширень [50, 51, 52].

Однак ординарні СП, можливі їх розширення при вирішенні прикладних задач звичайно не враховують або враховують не в повній мірі такі важливі характеристики процесів, як нечіткість уявлення і обробки даних [49], складну взаємодію та динаміку процесів в реальних системах [50]. Потрібно також враховувати ряд додаткових чинників для адекватного відображення предметної області. До них насамперед потрібно віднести параметри часу, складності, надійності, вартості та інші, що відображають конкретні важливі чинники предметної області.

Існуючі рішення на основі інтегрованих СП (ІСП) [51] є найбільш довершеними, але і вони вимагають нових рішень. У зв'язку з цим робота є актуальною. Доцільно розглянути можливість створення ефективних моделей,

побудованих на ідеях та принципах нечіткої логіки, теоріях розподілених та ієрархічних систем і моделей.

Таким чином, метою досліджень [53, 54] даної роботи є підвищення ефективності систем обчислювального інтелекту на основі розробки і впровадження математичних моделей аналізу і модифікації нечітких динамічних процесів, що відображають предметні області.

## **2.1 Побудова математичних моделей з використанням нечіткої логіки**

Нехай існує множина нечітких процесів (1.1). Процеси (1.1) при цілеспрямованій взаємодії на множині декартового добутку (1.2), реалізують деякий комплекс взаємодіючих та взаємопов'язаних задач.

Задачі визначені згідно з логікою функціонування складного об'єкта.

Процеси (1.1) і їх взаємодія (1.2) можуть бути синхронізовані, розвиватися у часі, можуть бути визначені в детермінованому, імовірнісному, нечіткому просторах станів.

Необхідно запропонувати підходи до побудови і реалізації таких моделей, що адекватно відображають процеси (1.1) та їх взаємодію (1.2) щодо реальних об'єктів і систем.

Як показав попередній аналіз, перспективним та доцільним для рішення поставленої задачі є застосування нечітких СП та їх модифікацій.

Враховуючи викладене вище, істотні обмеження та недоліки відомих моделей, в дослідженнях [51] запропоновані нові рішення та підходи до подальшого розвитку ідей по побудові математичних моделей. Розглянуті класи нечітких мережевих моделей (НММ), які інтегрують переваги моделей на основі СП і нейро-фаззи мереж (НФС). Вони багато в чому вільні від недоліків та обмежень утворюючих їх моделей.



Математичну НММ подамо як:

$$\tilde{S}(f) = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}(f), \tilde{M}(f)_0, L \rangle, \quad (2.1)$$

де  $\tilde{P} = \{\tilde{p}_j : \mu_{\tilde{p}_j}(k)\}$  – скінченна множина нечітких позицій,  $\tilde{p}_j$  –  $\mu_{\tilde{p}_j}(k)$  – функція належності  $j$ -й нечіткої позиції множини,  $\tilde{P}$ ,  $k$  – деяка змінна, що визначає аргумент функції  $\mu_{\tilde{p}_j}(k)$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $\tilde{P} \neq \emptyset$ ,  $|\tilde{P}| = m$ ;

$\tilde{T} = \{\tilde{t}_i : \mu_{\tilde{t}_i}(k)\}$  – скінченна множина нечітких переходів  $\tilde{t}_i$ ,

$i = \overline{1, n}$ ,  $\tilde{T} \neq \emptyset$ ,  $|\tilde{T}| = n$ ;  $\mu_{\tilde{t}_i}(k)$  – функція належності  $i$ -го нечіткого переходу,

$$\tilde{F}(f) : (\tilde{P} \times \tilde{T}) \cup (\tilde{T} \times \tilde{P}) \rightarrow \{x_{ij}(k), y_{ij}(k)\} \quad (2.2)$$

– нечітка функція інцидентностей  $\tilde{P}$  і  $\tilde{T}$ ,  $x_{ij}(k)$ ,  $y_{ij}(k)$  – функції належностей вхідних і вихідних інцидентностей деяких нечітких позицій  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$  і нечітких переходів  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$ .

Початковий простір станів моделі (2.1) визначається вектором нечіткого початкового маркірування  $\tilde{M}(f)_0$  нечітких позицій  $\tilde{P}$  моделі. Тоді

$$\tilde{M}(f)_0 = \{\tilde{M}(\tilde{p}_j) : z_{\tilde{p}_j}(k)\}, \quad (2.3)$$

$\tilde{M}(\tilde{p}_j) \longrightarrow [0, 1]$  – нечітке маркірування нечіткої позиції  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$  НММ,

$z_{\tilde{p}_j}(k)$  функція належності маркірування  $j$ -ої нечіткої позиції  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$ ;

$L$  – деякий предикат від множини змінних  $\{x_u\}$ ,  $u \in U$ .

Зі збільшенням розмірності системи, що моделює ефективність підходів до побудови НММ, зменшується ефективність вихідної моделі через велику її

розмірність і необхідність врахування множини додаткових параметрів, характеристик, умов  $\{x_u\}, u \in U$ .

Істотним засобом зниження розмірності мережевих моделей (2.1) – (2.3) можна вважати кольорові нечіткі мережі Петрі.

У роботі [51] введено поняття нечітких кольорових мереж Петрі, які подані таким чином:

$$\tilde{S}_C(f) = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}_C(f), \tilde{M}_{0C}(f), \tilde{M}_C(f), L\{x_u\}, \tilde{C}, \tilde{V}, \tilde{K} \rangle, \quad (2.4)$$

де  $\tilde{P}$  – множина нечітких позицій;  $\tilde{T}$  – множина нечітких переходів;  $L\{x_u\}, u \in U$  – деякий предикат, віднесений на моделі на множині позицій, переходів, функції інцидентності в просторі станів нечітких взаємодіючих процесів та визначає додаткові умови виконання переходів;

$$\tilde{F}_C(f) = (\tilde{P} \times \tilde{T}) \cup (\tilde{T} \times \tilde{P}) \quad (2.5)$$

– нечітка функція інцидентностей мережі  $\tilde{S}_C(f)$ ;  $\tilde{C}$  – функція кольору маркера, що визначає в цьому випадку колір кожного з маркерів  $\tilde{M}$  ( $\tilde{p}_j$ ) для позицій мережі;  $\tilde{V}$  – умови виконання переходів в залежності від кольору маркера;  $\tilde{K}$  – обсяг маркерів в позиціях з урахуванням  $\tilde{C}$ ;  $\tilde{M}_C(f)_0$  – вектор початкового маркірування;  $\tilde{M}_C(f)$  – вектор поточного маркірування.

Як випливає з (2.4), мережа інтегрує мережу (2.3) і переваги МП [49]. Введення в її структуру предиката  $L\{x_u\}, u \in U$  (2.4), а також введення властивостей  $\tilde{C}, \tilde{V}, \tilde{K}$  істотно збільшує можливості моделі в порівнянні з існуючими підходами.

Все це дозволяє нам розглядати (2.4) як істотне розширення існуючих нечітких моделей.

Дійсно в практичних реалізаціях такий підхід дозволяє скоротити значною мірою розмірність процесів, що досліджуються.

Розглянемо демонстраційний приклад, коли процес може бути запущений на виконання лише при наявності факту виконання декількох умов. На даному прикладі ми продемонструємо додаткові можливості моделі з використанням мережі (2.4) в порівнянні з моделлю на основі мережі (2.1).

Нехай, для визначеності, існує процес (дія)  $\tilde{d}_r$ , для виконання якого необхідне виконання трьох умов:  $\tilde{U}_1, \tilde{U}_2, \tilde{U}_3$  з множини  $\tilde{U}_l, l \in L$ . Побудуємо фрагмент моделі процесів з використанням мережі (2.1) (рис. 2.1). Маркірування позицій  $p_1, p_2, p_3$  дійсно забезпечує виконання переходу  $t_1$  (дія  $\tilde{d}_r$ ).

Для тих же початкових умов побудуємо фрагмент моделі з використанням мережі (2.4) (рис. 2.2).

На рис. 2.2 позиція  $p_3$  маркірована маркерами трьох кольорів, що умовно показано як додаткове маркірування деяких умовних позицій  $p_1, p_2$ . Фрагмент моделі, запропонований на рис. 2.2, значно простіше в значенні ресурсних витрат, ніж фрагмент моделі, запропонований на рис. 2.1. Цей вигравш, очевидно, буде збільшуватися зі зростанням розмірності моделі.

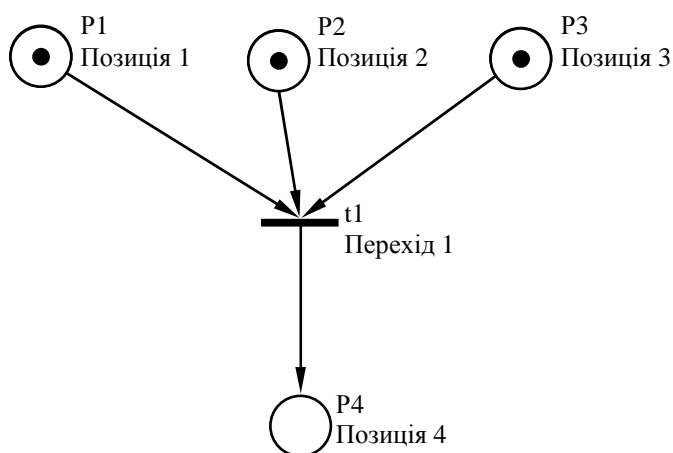


Рис. 2.1 – Фрагмент моделі, побудований з використанням мережі (2.1)

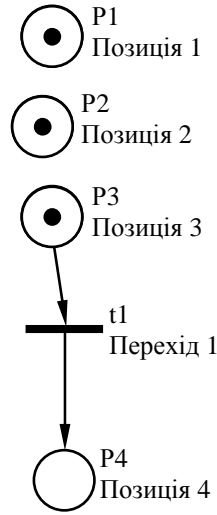


Рис. 2.2 – Фрагмент моделі, побудований з використанням мережі (2.4)

Обмеженням в застосуванні мереж (2.4) є те, що в них відсутні засоби синхронізації виконання переходів з  $\tilde{T}$ , їх застосування ускладнюється при моделюванні процесів, для яких актуальна їх синхронізація. У зв'язку з цим введемо [53] в функцію інцидентності мережі, кольорові інгібіторні дуги. Існуючі підходи до застосування інгібіторних дуг [49] засновані на множині  $\{0,1\}$ , що в реальних системах в нечіткому просторі станів погано аргументовано.

**Твердження 2.1.** Якщо задана мережа (2.4), то для синхронізації виконання деяких нечітких переходів

$$\exists t_i(sn) \in \tilde{T} \quad (2.6)$$

у вхідну компоненту  $In = \tilde{P} \times \tilde{T}$  її функції інцидентності  $\tilde{F}(f) = (\tilde{P} \times \tilde{T}) \cup (\tilde{T} \times \tilde{P})$  досить ввести нечіткі інгібіторні (стримуючі) дуги

$$Arc(sn)_\alpha \in \{Arc_\beta\}, \alpha \in A, \beta \in B, A \subseteq B. \quad (2.7)$$

Справедливість твердження 2.1 безпосередньо одержуємо із визначення інгібіторної дуги [49]. Введення ж властивостей кольору і нечіткості розширює функції інгібіторної дуги (2.7).

Нехай існує деякий дозволений перехід (2.6) мережі (2.4) [51]. Визначимо для нього додаткові умови дозволеності з урахуванням введення дуги (2.7).

**Твердження 2.2.** Деякий перехід (2.6) дозволений, якщо для нього додатково існує вхідна дуга (2.7) від інцидентної вхідної позиції  $p_j \in \{p_i(in)\}$  і справедливо

$$\exists t_i(sn) \in \tilde{T} \mid \left( \left( \tilde{M}_C(f)_{p_j \in \{p_i(in)\}} > 0 \right) \& \left( x_{ij}(k) > x_{ij}(k)^{(ad)} \right) \right) \& \left( \tilde{V}_C(sn) = true \right), \quad (2.8)$$

де  $\tilde{V}_C(sn)$  - умови спрацювання переходів в залежності від кольору маркера.

Справедливість твердження 2.2 виходить з умов функціонування вхідної інгібіторної дуги даного переходу з урахуванням введення додатково функції кольору і допустимого нижнього порогового значення функції належності  $x_{ij}(k)^{(ad)}$ .

**Твердження 2.3.** Якщо існує модель (2.4), для деяких переходів (2.6), введені додатково нечіткі інгібіторні дуги (2.6), то її функція інцидентності може бути представлена, як

$$\tilde{F}^M_C = \tilde{F}_C(f) \cup \tilde{F}_C(Arc), \quad (2.9)$$

де  $\tilde{F}_C(Arc)$  – вхідна інгібіторна інцидентність деякого переходу (2.6).

Справедливість твердження 2.3 визначається суттю функції інцидентності (2.5) і конструкції, що пропонується в роботі на основі нечітких інгібіторних дуг (2.7).

Тоді модель, що пропонується в роботі, може бути представлена у вигляді

$$\tilde{S}_C^{(M)}(f) = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}_C^{(M)}(f), \tilde{M}_{0C}(f), \tilde{M}_C(f), L\{x_u\}, \tilde{C}, \tilde{V}, \tilde{K} \rangle. \quad (2.10)$$

Для відображення і формалізації процесів на моделі в роботі [51] сформульовані такі правила інтерпретації компонент моделі:

- множина нечітких переходів  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  НММ  $\tilde{S}(f)$  інтерпретує множину нечітких дій нечітких процесів  $\{\tilde{d}_r\}, r \in R$ , що моделюються;
- множина нечітких позицій  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$  НММ  $\tilde{S}(f)$  інтерпретує множину нечітких умов  $\tilde{U}_l, l \in L$  виконання множини нечітких дій  $\{\tilde{d}_r\}$ ;
- динаміка процесів, що моделюються інтерпретується переміщенням нечітких маркерів на множині нечітких позицій  $\{\tilde{p}_j\}$  через множину дозволених нечітких інцидентних переходів;
- функція кольору маркера  $\tilde{C}$ , що визначає в цьому випадку колір  $c$  кожного з маркерів  $\tilde{M}(\tilde{p}_j)$  для позицій мережі, інтерпретує множину ознак маркера, що відображає деяку фізичну суть об'єкта моделювання;
- простір станів  $\{\tilde{A}_j\}, j \in J$  динамічних взаємодіючих нечітких процесів інтерпретується множиною векторів маркірування  $\{\tilde{M}(f)_s\}, s \in S$  множини позицій  $\{\tilde{p}_j\}$  в просторі станів НММ.

Прийнявши за основу класичну формалізацію і інтерпретацію динамічних взаємодіючих нечітких процесів, в роботі [51] розглянуті деякі окремі випадки подання взаємодіючих процесів для випадків, які можуть бути корисними в даній роботі:

- процес виконується при наявності рівно одного вхідного і рівно однієї вихідної умови (рис. 2.3).

Аналітично фрагмент (рис. 2.1) має вигляд:

$$\exists \tilde{t}_i \in \tilde{T} \parallel |\{\tilde{p}_i(in)\}| = |\{\tilde{p}_i(out)\}| = 1. \quad (2.11)$$

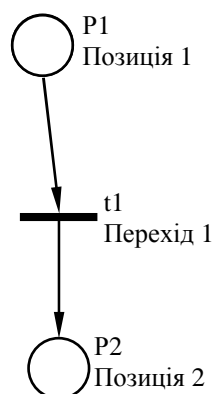


Рис. 2.3 – Фрагмент моделі згідно з (2.11)

Для виконання переходу  $t_1$  (рис. 2.3) необхідне маркірування позиції  $p_1$ , що визначає наявність всіх необхідних умов для виконання дії, яке інтерпретується переходом  $t_1$ ;

- процес виконується при наявності декількох, не рівній одній вхідній і рівно однієї вихідної умови (рис. 2.4).

Аналітично фрагмент (рис. 2.4) має вигляд:

$$\exists \tilde{t}_i \in \tilde{T} \mid (|\{\tilde{p}_i(in)\}| > 1) \text{ and } (|\{\tilde{p}_i(out)\}| = 1). \quad (2.12)$$

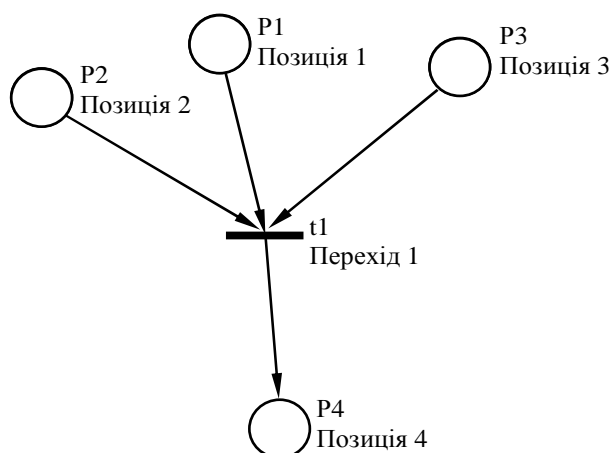


Рис. 2.4 – Фрагмент моделі згідно з (2.12)

Для виконання переходу необхідне маркірування позицій  $\{p_1, p_2, p_3\}$ , що визначає наявність всіх необхідних умов для виконання дії, яка інтерпретується переходом;

- процес виконується при наявності рівно однієї вхідної і декількох, не рівних одній, вихідних умов (рис. 2.5). Аналітично фрагмент (рис. 2.5) має вигляд:

$$\exists \tilde{t}_i \in \tilde{T} \mid (|\{\tilde{p}_i(in)\}|=1) \text{ and } (|\{\tilde{p}_i(out)\}|>1). \quad (2.13)$$

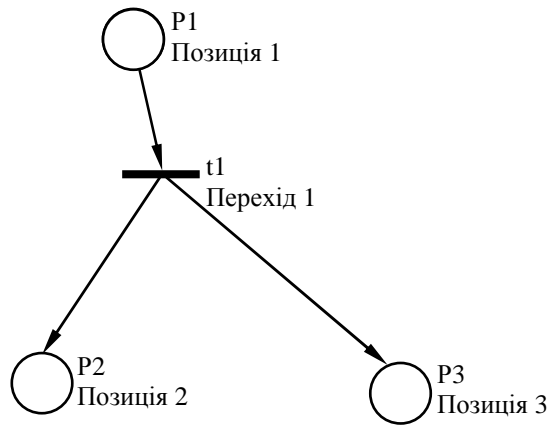


Рис. 2.5 – Фрагмент моделі згідно з (2.13)

Для виконання переходу  $t_1$  необхідна маркіровка позиції  $p_1$ , що визначає наявність всіх необхідних умов для виконання дії з розпаралелювання процесів, яке інтерпретується переходом  $t_1$  ;

- деяка умова виконання процесу має декілька, не рівних одному, вхідних процесів і рівно один вихідний процес (рис. 2.6).

Аналітично фрагмент (рис. 2.6) має вигляд:

$$\exists \tilde{p}_j \in \tilde{P} \mid (|\{\tilde{t}_j(in)\}|>1) \text{ and } (|\{\tilde{t}_j(out)\}|=1). \quad (2.14)$$



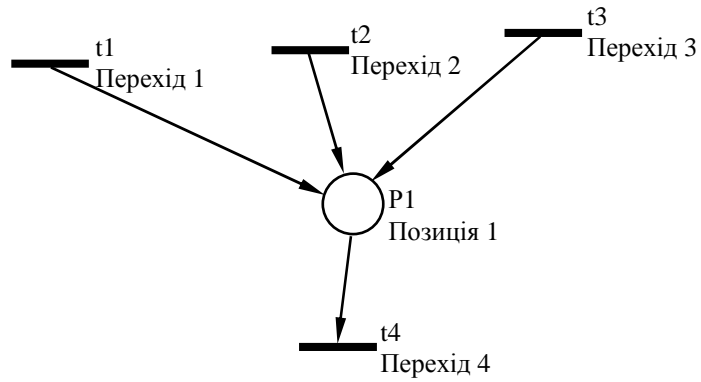


Рис. 2.6 – Фрагмент моделі згідно з (2.14)

Для маркірування позиції  $p_1$  і виконання деяких умов по моделюванню взаємодіючих процесів необхідно виконання дій  $t_1, t_2, t_3$ , що інтерпретуються відповідним переходами.

- деяка умова виконання процесу має рівно один вхідний процес і декілька не рівних одному вихідних процесів (рис. 2.7):

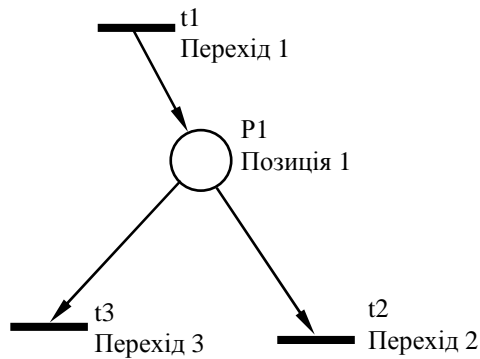


Рис. 2.7 – Фрагмент моделі згідно з (2.15)

Аналітично фрагмент (рис. 2.7) має вигляд:

$$\exists \tilde{p}_j \in \tilde{P} \mid (|\{\tilde{t}_j(in)\}|=1) \text{ and } (|\{\tilde{t}_j(out)\}|>1). \quad (2.15)$$

Для маркірування позиції  $p_1$  і виконання деяких умов по моделюванню взаємодіючих процесів необхідно виконання дій, що інтерпретуються переходом  $t_1$ ;

- деяка умова має тільки рівно один вихідний процес (рис. 2.8)

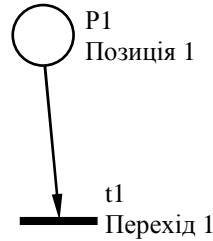


Рис. 2.8 – Фрагмент моделі згідно з (2.16)

Аналітично фрагмент (рис. 2.8) має вигляд:

$$\exists \tilde{p}_j \in \tilde{P} \mid (|\{\tilde{t}_j(in)\}| = 0) \text{ and } (|\{\tilde{t}_j(out)\}| = 1). \quad (2.16)$$

Для виконання переходу  $t_1$  необхідна маркіровка позиції  $p_1$ , що визначає наявність всіх необхідних вхідних умов для початку виконання дій, які визначені логікою процесів, що моделюються;

- деяка умова має тільки рівно один вхідний процес (рис. 2.9):

Аналітично фрагмент (рис. 2.9) має вигляд:

$$\exists \tilde{p}_j \in \tilde{P} \mid (|\{\tilde{t}_j(in)\}| = 1) \text{ and } (|\{\tilde{t}_j(out)\}| = 0). \quad (2.17)$$

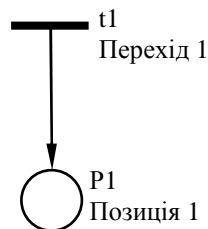


Рис. 2.9 – Фрагмент моделі згідно з (2.17)

Для маркірування позиції  $p_1$  і завершення комплексу деяких умов по моделюванню взаємодіючих процесів необхідне виконання дій, що інтерпретуються переходом  $t_1$ ;

- процес виконується при наявності декількох не рівних одному вхідних і декількох не рівних одному вихідних умов (рис. 2.10):

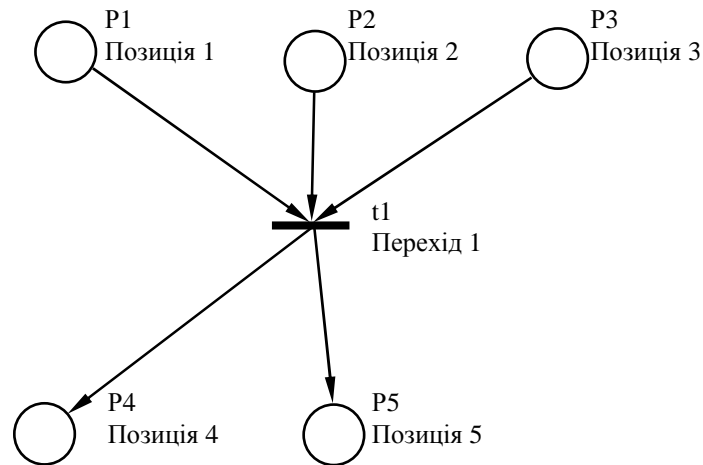


Рис. 2.10 – Фрагмент моделі згідно з (2.18)

Аналітично фрагмент (рис. 2.10) має вигляд:

$$\exists \tilde{t}_i \in \tilde{T} \mid (|\{\tilde{p}_i(in)\}| > 1) \text{ and } (|\{\tilde{p}_i(out)\}| > 1). \quad (2.18)$$

Для виконання переходу  $t_1$  необхідна манкировка позицій  $p_1, p_2, p_3$ , що визначає наявність всіх необхідних умов для виконання дії, яке інтерпретується переходом  $t_1$ ;

- деяка умова виконання процесу має декілька не рівних одному вхідних процесів і декілька не рівних одному вихідних процесів (рис. 2.11).

Аналітично фрагмент (рис. 2.11) має вигляд:

$$\exists \tilde{p}_j \in \tilde{P} \mid (|\{\tilde{t}_j(in)\}| > 1) \text{ and } (|\{\tilde{t}_j(out)\}| > 1), \quad (2.19)$$

де  $\{\tilde{t}_j(in)\}$  – множина вхідних переходів позиції  $\tilde{p}_j$ ;  $\{\tilde{t}_j(out)\}$  – множина вихідних переходів позиції  $\tilde{p}_j$ .

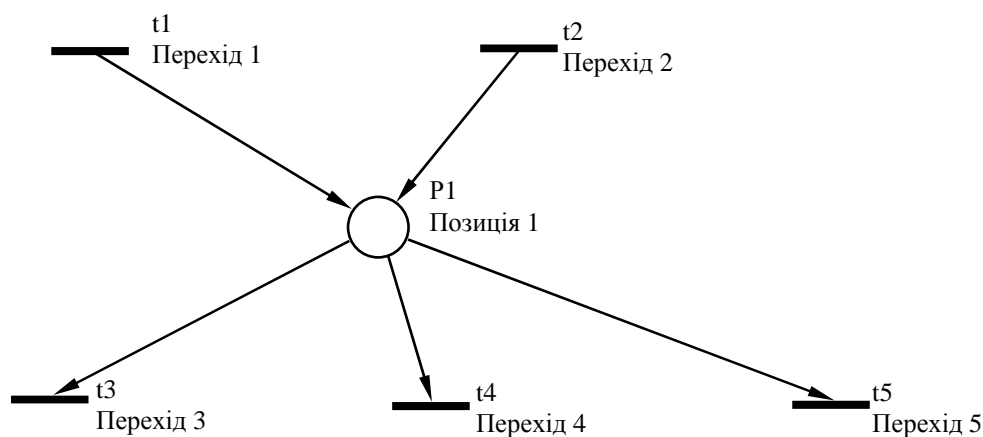


Рис. 2.11 – Фрагмент моделі згідно з (2.19)

Для маркірування позиції  $p_1$  і виконання деяких умов по моделюванню взаємодіючих процесів необхідне виконання дій, що інтерпретуються переходами  $t_1, t_2$ .

Однак, як показано в роботі [51], фрагмент (2.18) може бути поданий як послідовне з'єднання фрагментів (2.12) і (2.13), фрагмент (2.19) може бути представлений як послідовне з'єднання фрагментів (2.14) і (2.15). У зв'язку з цим, ми, якщо це не буде додатково обгрунтовано, виключаємо з подальшого самостійного розгляду ці фрагменти.

**Зауваження 2.1.** НММ, побудовані на розширенні нечітких МП  $\tilde{S}^{(M)}_C(f)$ , що мають значні функціональні можливості моделювання, не завжди дозволяють ефективно дослідити також складні процеси типу часових рядів, вирішувати задачі ідентифікації, прогнозування для безперервних і дискретних процесів. Ці властивості мають штучні нейронні мережі та їх розширення - нейро-фаззі мережі (НФС) [51, 55, 56].

У зв'язку з цим доцільно розглянути можливості застосування НФС в складі розширень НММ.

## **2.2 Розвиток нечітких мережевих моделей на основі інтеграції розширень та інтеграції нечітких мереж Петрі та нейро-фаззі мереж**

У задачах моделювання складних інтелектуальних систем великої розмірності моделями на основі мереж (2.10) може бути також виникнути проблема, пов'язана з недопустимо великою розмірністю моделі. Це знижує її переваги і робить слабкою в задачах адаптації до об'єкта моделювання.

Таким чином, як вже відзначалося вище, для зниження розмірності моделі зручно застосувати моделі на основі інтеграції мереж класу (2.10) і НФС. Такий підхід концентрує переваги утворюючих моделей, а також знижує розмірність та розширює їх можливості [51].

**Твердження 2.4.** Нехай існує розширена модель  $\tilde{S}^{(M)}_C(f)$  і модель на основі НФС  $\tilde{S}_N(f)$ , то інтеграція цих моделей

$$\tilde{S}^{(Int)}_C(f) = \tilde{S}^{(M)}_C(f) \cup \tilde{S}_N(f) \quad (2.20)$$

може бути представлена у вигляді реалізації таких дій:

- для деяких переходів  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  введено додатково процедури

$$\tilde{Pr}_{ki} \in \{\tilde{Pr}_k\}, k \in K, i \in I; \quad (2.21)$$

- для деяких позицій  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$  введено додатково процедури

$$\tilde{Pr}_{kj} \in \{\tilde{Pr}_k\}, k \in K, j \in J; \quad (2.22)$$

- для деяких маркіровок позицій  $\tilde{M}_{C\alpha}(\tilde{p}_j) \in \tilde{M}_C(f)$  з урахуванням кольору маркера введено додатково процедури

$$\tilde{\text{Pr}}_{k\tilde{M}(\tilde{p}_j)} \in \{\tilde{\text{Pr}}_k\}, k \in K, j \in J, \quad (2.23)$$

причому процедури (2.21) – (2.23) реалізуються переважно моделями на основі мереж  $\tilde{S}_N(f)$ .

Справедливість твердження 2.4 безпосередньо виходить з визначення моделей на основі мереж  $\tilde{S}^{(M)}_C(f)$  і можливості реалізації процедур  $\tilde{\text{Pr}}_k, k \in K$  моделями на основі мереж  $\tilde{S}_N(f)$ .

Результати виконання процедур (2.21) – (2.23) визначають додаткові умови виконання (2.8) переходів  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  і маркірування позицій  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$  з урахуванням кольору маркірування  $\tilde{M}_{C\alpha}(\tilde{p}_j) \in \tilde{M}_C(f)$  при моделюванні складних процесів моделями на основі мереж  $\tilde{S}_N(f)$ . Визначивши умови виконання деякого переходу мережі  $\tilde{S}^{(M)}_C(f)$  з урахуванням (2.8) як  $\tilde{R}^{(M)}_C(f)$  сформулюємо таке твердження.

**Твердження 2.5.** Якщо існує мережа  $\tilde{S}^{(Int)}_C(f)$  (2.11), то виконання її переходів може бути представлено у вигляді

$$\tilde{R}^{(Int)}_C(f) = (R^{(M)}_C(f) = true) \& (\tilde{\text{Pr}}_k \in \{\tilde{\text{Pr}}_k\} \mid \tilde{\text{Pr}}_k = true). \quad (2.24)$$

Справедливість (2.24) безпосередньо виходить з умови дозволеності переходів [51], а також виразів (2.8), (2.20) та умови істинності виконання процедур (2.21) – (2.23).

Важливим напрямком підвищення рівня конкурентно здібності виробничих об'єктів є контроль і оцінка технічного стану об'єктів і ресурсів як

в поточний час, так і в прогнозованому майбутньому на основі інтелектуальних засобів прийняття рішень.

Особливо це актуальне в розподілених виробничих системах, а також в ієрархічних газотранспортних та газорозподільних мережах. При цьому необхідно враховувати як об'єктивні, так і суб'єктивні чинники, здатні впливати на об'єкт контролю. Важливою складовою є також вплив метеорологічних чинників, фізико-хімічної складової середовища функціонування трубопроводів, склад об'єкта транспортування. Більшість існуючих чинників погано формалізуються і їх вплив може бути виконано на основі нечітких оцінок експертів.

Для вирішення актуальних задач оцінки стану об'єкта в нечітких умовах авторами запропоновані підходи з використанням наукових результатів даної роботи.

У практичних реалізаціях реального об'єкта впровадження дозволило, за оцінками експертів, істотно підвищити достовірність рішень, що приймаються за результат оцінки стану об'єкта, що підтверджено впровадженнями.

### **2.3 Розширення модифікованих гібридних математичних моделей складних систем**

У цей час при побудові систем управління і обробки даних складних об'єктів з використанням ідей і підходів штучного інтелекту [57] часто виникають проблеми адекватного, на основі принципів мінімальної складності [58], відображення реальних процесів предметних областей.

Простір станів складних об'єктів звичайно характеризується множиною параметрів, які досить складно врахувати, оскільки ці параметри не завжди чітко визначені, до них пред'являються досить високі, часто суперечливі вимоги. Простір станів таких об'єктів часто є нечітким, що вимагає додаткових досліджень, залучення знань експертів.

Використовуючи принцип мінімальної складності [58], сучасні підходи на основі ідей та технологій штучного інтелекту, моделі аналізу станів такого об'єкта та процесів управління доцільно будувати на основі підходів стратифікованого опису [11]. На жаль, в цей час відсутні конструктивні рішення, що враховують нечіткий простір станів ієрархічних структур та істотну невизначеність в представленні процесів предметних областей.

У зв'язку з цим дослідження, що пропонуються є актуальними. Метою роботи [59, 60, 61] є підвищення достовірності рішень, що приймаються про стан об'єкта управління, що функціонує в умовах невизначеності, нечіткого простору станів.

**Розробка структури моделі.** Нехай існує множина процесів (2.1), які характеризуються ієрархічною підлеглистю, паралельно-послідовною взаємодією. Деякі їх характеристики можуть бути подані в детермінованому  $\{d_\alpha\}$ , ймовірному  $\{p_\alpha\}$  і (або) нечіткому  $\{f_\alpha\}$  просторі станів. Деяка підмножина процесів

$$\{PR'_\alpha\} \subseteq \{PR_\alpha\}, \alpha \in A \quad (2.25)$$

що функціонують в деякому просторі з

$$d_\alpha \in \{d_\alpha\}, p_\alpha \in \{p_\alpha\}, f_\alpha \in \{p_\alpha\}, \alpha \in A \quad (2.26)$$

визначені та розвиваються у часі

$$\{\tau_\alpha\}, \alpha \in A.$$

Необхідно, виходячи з особливостей процесів (що досліджуються в розділі 1), запропонувати та обґрунтувати структуру моделі, яка адекватно відображає множину процесів реальних об'єктів.

У задачах управління та прийняття рішень складних об'єктів звичайно можна виділити декілька рівнів деталізації. До них, насамперед, потрібно віднести:

- рівень задач організаційного управління та прийняття рішень;



- рівень задач управління та контролю технічного стану об'єкта;
- рівень задач управління, прогнозування та оцінки технічного стану об'єкта.

Кожний рівень визначається різною глибиною деталізації опису процесів і особливостей представлення простору станів.

На основі приведенного вище короткого аналізу по суті питання стає очевидним, що тільки підходи з використанням гібридних моделей, які б враховували особливості виділених рівнів, а також інтегрували переваги складових їх моделей при одночасному виключенні їх недоліків, є перспективними.

Таким чином, для моделювання процесів (2.1) може бути запропонована така структура моделі подання та опису виділених рівнів (рис. 2.12).

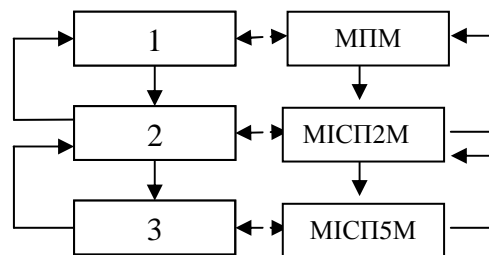


Рис. 2.12 – Структура гібридної моделі при описі виділених рівнів

Так рівень 1 (рис. 2.12), що представляє задачі організаційного управління, адміністрування та прийняття рішень характеризується мінімальною невизначеністю, але вимагає обліку великої кількості визначальних чинників. Це пов'язано з тим, що зміст задач значною мірою визначається взаємодіючими процесами директивного характеру, що глибоко вивчено в класичних постановках. Для моделей цього рівня (МПМ) доцільним є використання розширень предикатних кольорових мереж Петрі  $S_C(L)$  [59, 60, 61].

Рівень задач 2 (рис. 2.12), що описує задачі управління та контролю технічного стану об'єкта, як показали дослідження та аналіз існуючих підходів [12, 51], значною мірою може характеризуватися нечітким простором станів і

істотною невизначеністю. Рішення задач на цьому рівні вимагають додаткових розробок та досліджень з метою урахування в моделях вказаних важливих властивостей. Найбільш прийнятними рішеннями можуть бути застосування моделей (МІСП2М) на основі модифікації інтегрованих нечітких мереж Петрі  $\tilde{S}^{(M)}_C(f)$  [51, 53].

Рівень задач 3 (рис. 2.12), що представляє задачі управління, прогнозування і оцінки технічного стану об'єкта, внаслідок особливостей комплексу задач, що вирішуються, звичайно характеризується значною невизначеністю, вимагає застосування додаткових засобів контролю та прогнозування в умовах невизначеності. Для таких моделей (МІСП5М) характерне використання штучних нейро-фаззі мереж і нейро-фаззі мереж Петрі [51], а також їх розширень  $\tilde{S}^{(int)}_C(f)$  [61, 62].

Тоді ієрархічна модель процесів може бути представлена у вигляді:

$$\tilde{S}^{(h)}_C(f) = \cup (S_C(L), \tilde{S}^{(M)}_C(f), \tilde{S}^{(int)}_C(f)), \quad (2.27)$$

де символ « $\cup$ » несе деяку додаткову функціональність навантаження, пов'язану з наявністю та особливостями міжрівневих зв'язків моделі.

Очевидно, що зв'язки між рівнями [11] опису предметної області (рис.2.12) повинні бути адекватно відображені відповідними зв'язками на моделі (2.27). Згідно з [11], однією з найважливіших проблем ієрархічних систем є проблема здійснення переходу з одного рівня на інший рівень системи, визначення, як поведінка системи на одному рівні впливає на поведінку системи на інших суміжних рівнях. У роботі [11] під заголовком «втручання» авторам в концентрованому вигляді вдалося сформулювати деякі варіанти відношень вищого рівня з нижчим:

- координування шляхом прогнозування взаємодій, коли нижчий рівень генерує свої локальні рішення в припущенні, що координуючі впливи будуть саме такими;

- координування шляхом оцінки взаємодій, коли вищий рівень задає діапазон значень, які на нижньому рівні розглядаються як збурення;
- координування шляхом «розв'язання» взаємодій, коли елементи нижчого рівня інтерпретують зв'язуючий сигнал як додаткову змінну рішення;
- координування типу «наділення відповідальності», коли елементи нижчого рівня знають про наявність інших елементів, також що приймають свої рішення на тому ж рівні та існує модель взаємодії цих елементів;
- координування шляхом «створення коаліцій», коли елементи нижчого рівня знають про існування інших вирішальних елементів на тому ж рівні, а елемент вищого рівня визначає, який характер зв'язків допустимий між ними, що призводить до коаліційних або конкурентних відношень.

У зв'язку з цим, враховуючи викладене, важливо визначити особливості зв'язків між моделями МПМ, МІСП2М, МІСП5М в складі гібридної моделі (ГМ) [59]. Для зв'язку між моделями більш високого рівня й тими, що лежать на нижчих рівнях можуть бути розглянуті випадки, коли:

А) Потрібна синхронізація функціонування моделей на рівнях, що розглядаються так, що моделювання процесів на більш низькому рівні можливе лише при наявності відповідних даних від процесів більш високого рівня.

На рис. 2.13 перехід  $t_1$  належить моделі більш високого рівня, переходи  $t_2, t_4$  і позиції  $p_2, p_3$  належать моделі більш низького рівня, позиція  $p_1$ , перехід  $t_3$  належать елементам міжрівневого зв'язку.

Б) Потрібна координація функціонування моделей на рівнях, що розглядаються таким чином, що моделювання процесів на більш низькому рівні може використати відповідні дані від процесів більш високого рівня.

На рис. 2.14 перехід  $t_1$  і позиція  $p_1$  належать моделі більш високого рівня, переходи  $t_3, t_4$  і позиція  $p_3$  належать моделі більш низького рівня  $p_1$ , перехід  $t_2$  належить елементам міжрівневого зв'язку.

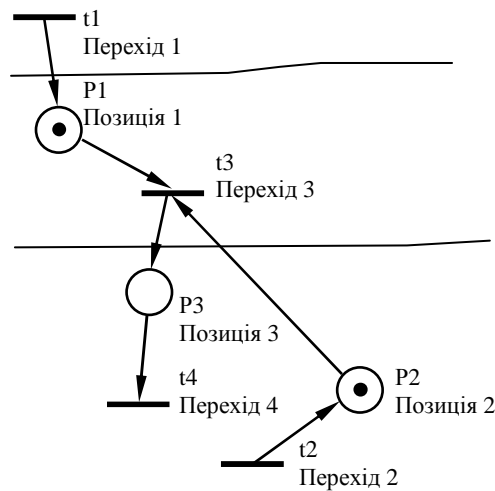


Рис. 2.13 – Зв'язок між рівнями моделей типу А

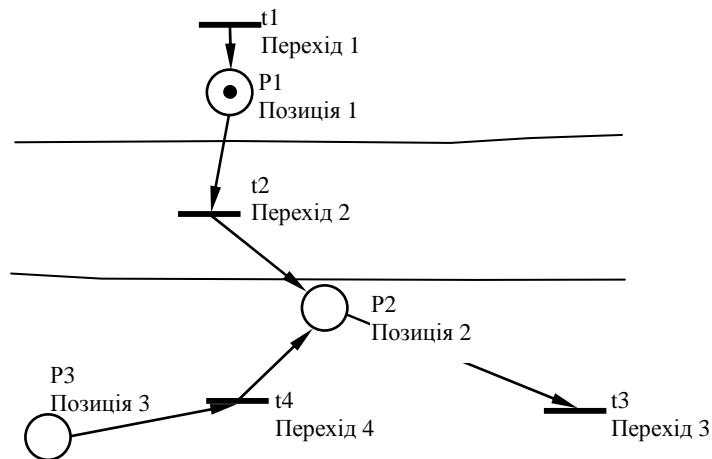


Рис. 2.14 – Зв'язок між рівнями моделей типу Б

Для зв'язку між моделями більш низького рівня опису і вищого рівня, як показав аналіз, може бути розглянутий, принаймні, випадок, коли на нижньому рівні формуються звітні дані про результати моделювання і деякі початкові поточні дані.

У цьому випадку елементи міжрівневих зв'язків можуть бути представлені у вигляді модифікацій типу А (рис. 2.15), типу Б (рис. 2.16), типу В (рис. 2. 17).

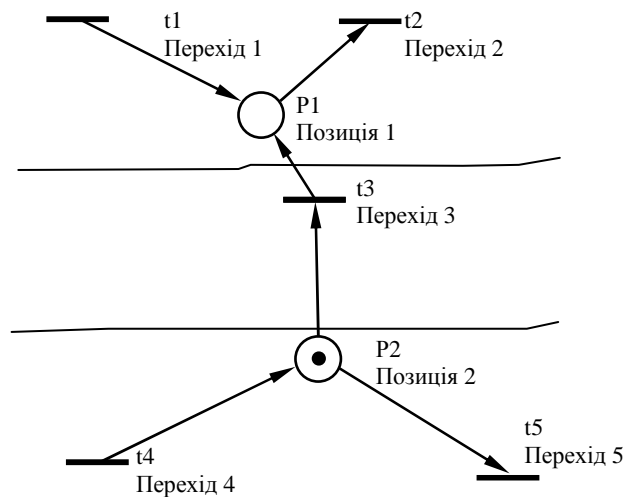


Рис. 2.15 – Зв'язок між моделями рівнів типу А

На рис. 2.15 переходи  $t_1$ ,  $t_2$  і позиція  $p_1$  належать моделі більш високого рівня, перехід  $t_4$ ,  $t_5$  і позиція  $p_2$  належать моделі більш низького рівня, перехід  $t_3$  належить елементам міжрівневого зв'язку.

На рис. 2.16 переходи  $t_1$ ,  $t_2$  і позиція  $p_1$  належать моделі більш високого рівня, перехід  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$  і позиції  $p_3$ ,  $p_4$  належать моделі більш низького рівня, перехід  $t_3$  і позиція  $p_2$  належать елементам міжрівневого зв'язку.

В) особливістю зв'язків між моделями нижчого та вищого рівнів типу В є те, що прийняття рішень на верхньому рівні можливо лише при наявності рішень (даних, знань) більш низького рівня (рис. 2.17).

На рис. 2.17 переходи  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  і позиції  $p_1$ ,  $p_2$  належать моделі більш високого рівня, перехід  $t_5$ ,  $t_6$ ,  $t_7$  і позиції  $p_5$ ,  $p_6$  належать моделі більш низького рівня, перехід  $t_4$  і позиції  $p_3$ ,  $p_4$  належать елементам міжрівневого зв'язку.

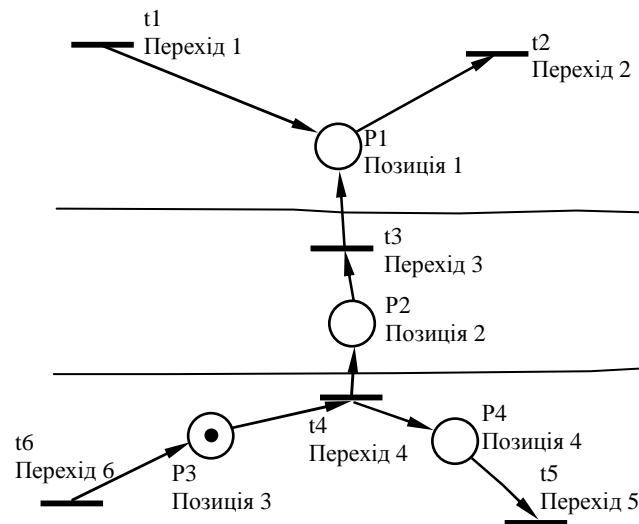


Рис. 2.16 – Зв'язок між моделями нижчого і вищого рівнів типу Б

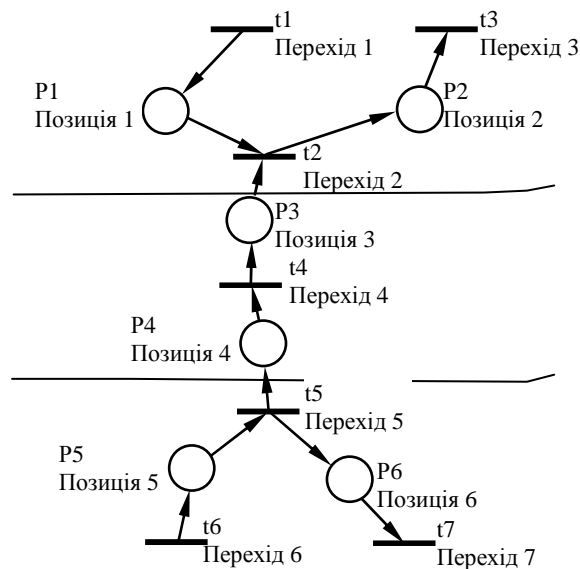


Рис. 2.17 – Зв'язок між моделями нижчого і вищого рівнів типу В

Виконаний аналіз показав, що отримані рішення значною мірою корелюються з принципами ієрархічності, викладеними в фундаментальних дослідженнях, наприклад [11].

Враховуючи різноманітність та важливість міжрівневих зв'язків в моделях, що пропонуються, визначимо особливості функціонування елементів міжрівневих зв'язків гібридної моделі.

## 2.4 Елементи міжрівневих зв'язків нечіткої гібридної моделі

Як показали попередні дослідження, особливостями елементів міжрівневих зв'язків гібридної моделі є те, що:

- переходу  $t_i$ , з урахуванням кольору маркера, поставлено у відповідність деякий предикат  $PR$ . Перехід  $t_i$  може бути дозволений, якщо справедливо

$$t_i \in T \mid ((M_{p_1} = 1) \& (M_{p_2} = 1) \& (PR = true)) \quad (2.28)$$

причому

$$PR = \begin{cases} true, & \text{if } ((\mu_{t_i} \geq \mu^{(ad)}) \& (\mu_{p_j \in p_i(in)} \geq \mu^{(ad)}) \& (\tau \geq \tau^{(ad)}) \& ((ex \leq ex^{(ad)}))), \\ false, & \text{else} \end{cases} \quad (2.29)$$

де  $M_{p_1}$  – маркірування вхідної позиції переходу, що розглядається,  $\mu_{t_i}$  – значення функції належності переходу, що розглядається,  $\mu_{p_j \in p_i(in)}$  – значення функції належності вхідної позиції переходу, що розглядається,  $\mu^{(ad)}$  – допустиме значення функції належності,  $\tau$  – значення часу реалізації дії,  $\tau^{(ad)}$  – допустиме значення часу реалізації дії,  $ex$  – вартісні показники,  $ex^{(ad)}$  – допустиме значення вартісних і деяких інших показників;

- дуга мережі між позицією  $p_j$  і переходом  $t_i$  може бути інгібіторною.

Перехід  $t_i$  з урахуванням (2.29) може бути дозволений, якщо справедливо

$$t_i \in T \mid ((M_{p_j} = 0) \& (M_{p_k} = 1) \& (PR = true)). \quad (2.30)$$

Підходи з використанням положень згідно (2.18) та (2.20) є основою розробки засобів вирішення прикладних задач.

Положення роботи мають важливе практичне значення для вирішення актуальних задач прийняття рішень в системах і засобах штучного інтелекту. Особливо це актуальне для задач аналізу і контролю стану складних об'єктів, де не існує достовірних даних або отримання їх ускладнене внаслідок різноманітних причин об'єктивного і суб'єктивного характеру.

Для вирішення таких задач доцільно розробити алгоритмічні, методичні і інструментальні засоби їх реалізації, в реальних додатках.

Як відзначено в роботах [53, 61], в ряді випадків структуру моделі на основі мереж Петрі доцільно подати матрицею інцидентності  $H$  в просторі станів [63]. Так, для побудови алгоритмічних і програмних інструментальних засобів була застосована матриця інцидентностей  $H$ , яка розглядалася в роботі спільно з вектором початкового маркірування  $\{\tilde{M}(\tilde{p}_j)\}$ . Елемент матриці  $H$  може бути представлено у вигляді:

$$\alpha_H = \begin{cases} -1, \text{ if } p_j \in \{p_i(in)\} \text{ and } p_j \notin \{p_i(out)\}, \\ 1, \text{ if } p_j \notin \{p_i(in)\} \text{ and } p_j \in \{p_i(out)\}, \\ 0, \text{ if } p_j \notin \{p_i(in)\} \text{ and } p_j \notin \{p_i(out)\}, \end{cases} \quad (2.31)$$

де  $\alpha_H$  – елемент матриці  $H$ ,  $\{p_i(in)\}$  – множина вхідних позицій  $i$ -го переходу,  $\{p_i(out)\}$  – множина вихідних позицій  $i$ -го переходу.

Для нечітких мереж Петрі в ряді випадків застосована модифікація матриці  $H$  (2.30) [61] у вигляді:

$$\alpha_{\tilde{H}(f)} = \begin{cases} x_{ij}(k), \text{ if } \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ and } \tilde{p}_j \notin \{\tilde{p}_i(out)\}, \\ y_{ij}(k), \text{ if } \tilde{p}_j \notin \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ and } \tilde{p}_j \in \{p_i(out)\}, \\ 0, \text{ if } \tilde{p}_j \notin \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ and } \tilde{p}_j \notin \{\tilde{p}_i(out)\}, \end{cases} \quad (2.32)$$



де  $\{\tilde{p}_i(in)\}$  – множина нечітких вхідних позицій  $i$ -го нечіткого переходу,  $\{\tilde{p}_i(out)\}$  – множина нечітких вихідних позицій  $i$ -го нечіткого переходу,  $x_{ij}(k)$ ,  $y_{ij}(k)$  – ненульові функції належності відповідно вхідних і вихідних інцидентностей деякого нечіткого переходу мережі.

Важливим напрямом є розробка також засобів адаптації до широкого кола задач з урахуванням особливостей предметних областей. Випробування розробки для розподілених комплексів показало адекватність і ефективність прийнятих в роботі рішень.

## Висновки до розділу 2

Відповідно до поставленого в даній роботі комплексу вирішуваних задач, в розділі розглянуто і вирішено наступні задачі:

1. На основі аналізу особливостей взаємодіючих процесів предметної області і виділених рівнів визначено, що процеси часто характеризуються ієрархічністю, значною складністю, функціонують в умовах невизначеності нечіткого простору станів.

2. Уперше запропоновано та обґрунтовано мережеві математичні моделі процесів аналізу простору станів складних об'єктів, які використовують ієрархію розширених кольорових інтегрованих нечітких мереж Петрі, засоби синхронізації на основі кольорових інгібіторних дуг, механізми управління міжрівневими зв'язками прямої і зворотної дії, що дозволяє підвищити ефективність оцінки ієрархії нечітких процесів, які взаємодіють на множині відношень «умова–дія».

3. Для взаємодіючих процесів запропонована і обґрунтована структура нової гібридної моделі опису і аналізу процесів предметної області, що функціонує в умовах невизначеності нечіткого простору станів. Гібридна модель заснована на взаємодіючих розширених предикатних кольорових мережах Петрі, розширеннях класів інтегрованих нейро-фаззі мереж Петрі. 3

метою адекватного відображення особливостей предметної області визначено і обґрунтовано особливості і типи зв'язків між взаємопов'язаними моделями.

4. Запропоновано комплекс тверджень, що формалізують умови дозволеності переходів в умовах синхронізації нечітких процесів на основі нечітких кольорових інгібіторних дуг мереж Петрі, що дозволяє адекватно відображати і моделювати реальні процеси предметних областей.

5. Сформульовано рекомендації з практичного застосування теоретичних положень роботи в інтелектуальних системах з прийняття рішень в складних технологічних комплексах.

6. Перспективним напрямом розвитку досліджень є розробка методів ефективного використання розробки в практичних додатках предметних областей.

### РОЗДІЛ 3

## МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В НЕЧІТКОМУ ПРОСТОРІ СТАНІВ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЇ МЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ

Проблема аналізу адекватності у взаємодії процесів в умовах невизначеності є досить дослідженою. Зокрема, в роботах [10, 64–66] розглянуті деякі важливі питання з теми досліджень. Аналіз показав, що задачі досяжності та несуперечності цілей в умовах невизначеності є одними з головних задач моделювання. Їх рішення викликають істотні труднощі, важливість та складність їх вирішення значна. Очевидно, що задача аналізу нечітких ієрархічних та розподілених процесів посилюється наявністю ієрархічних рівнів і впливу властивостей нечіткості на розвиток процесів.

Існуючі підходи, наприклад [64–66], враховуючи складність їх адаптації до ієрархії процесів і моделей, не дозволяють повною мірою використати їх в теоретичних дослідженнях і практичних додатках.

У зв'язку з цим дані дослідження [67, 68, 69, 70] є важливими і актуальними, направлені на підвищення ефективності та достовірності рішень, що приймаються в умовах невизначеності.

### **3.1 Підходи до побудови методів аналізу процесів прийняття рішень в нечіткому просторі станів об'єктів на основі ієрархії мережових моделей**

Нехай існує множина нечітких процесів (1.1) [53, 67], деякі з них

$$\{PR_{i(L_e)}^{(S)}\} \subseteq \{PR_i^{(S)}\}, \quad i \in I \quad (3.1)$$

відображають ієрархію при їх взаємодії.

Процеси (1.1), (3.1) при цілеспрямованій взаємодії на множині декартового добутку (1.2), причому в загальному випадку для (1.2) справедливе (1.3), реалізують деякий комплекс взаємодіючих задач  $T_s$ . Задачі  $T_s$  визначені згідно з логікою функціонування складного об'єкта.

Для цілей моделювання нечітких процесів (1.1), (3.1) в [59] запропоновано моделі аналізу простору станів складних об'єктів. Об'єкти характеризуються паралельно-послідовною асинхронною взаємодією, наявністю альтернатив при прийнятті рішень на множині критеріїв та обмежень, розподіленістю [10] та ієрархічністю [11] взаємодіючих динамічних процесів на множині (1.2). Процеси (1.1), (3.1) та їх взаємодія (1.2) розвиваються у часі.

Необхідно запропонувати та обґрунтувати критерії та методи виявлення на мережевих моделях властивостей досяжності  $Rch(S)$ , несуперечності  $\overline{Cont}(S)$  на множині критеріїв і обмежень.

Простір станів взаємодіючих процесів (3.1) визначено на множині

$$\{St_i\}, i \in I. \quad (3.2)$$

Початковий стан при розвитку процесів визначимо простором початкових станів

$$\{St^{(b)}_i\} \subset \{St_i\}, i \in I. \quad (3.3)$$

Кінцевий стан при розвитку процесів визначимо простором кінцевих станів

$$\{St^{(e)}_i\} \subset \{St_i\}, i \in I, \quad (3.4)$$

причому в загальному вигляді

$$\{St^{(b)}_i\} \cap \{St^{(e)}_i\} \neq \emptyset. \quad (3.5)$$

Сформулюємо твердження, що визначає умови досяжності цілей рішень, що приймаються за умови, що для всіх процесів (3.1) і простору станів значення функцій належності

$$\mu_{PR}(k_0) = 1, \mu_{St}(k_0) = 1, \quad (3.6)$$

де  $k_0$  – деяка змінна.

**Твердження 3.1.** Якщо визначена множина ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$ , множина процесів (3.1), простір початкових станів (3.3), причому  $\{St^{(b)}_i\} \neq \emptyset$ , та виконується (3.6), то цілі рішень, що приймаються як досяжні, якщо при цілеспрямованому виконанні процесів справедливо

$$\begin{aligned} \forall PR_{i(Le)}^{(S)}, PR_{i(Le)}^{(S)} \in \{PR_{i(Le)}^{(S)}\} i \in I; \\ \forall Le_j, Le_j \in \{Le_j\}, j \in J \mid |(\{St_{(fc)}^{(e)}\} = \{St_{(ex)}^{(e)}\})|. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Справедливість твердження 3.1 очевидна, якщо врахувати, що потрібно для всіх процесів на всіх ієрархічних рівнях забезпечити рівність множин очікуваних  $\{St_{(ex)}^{(e)}\}$  та фактичних  $\{St_{(fc)}^{(e)}\}$  просторів станів, що і визначає властивості досяжності.

Сформулюємо твердження, що визначає деякі умови несуперечності рішень, що приймаються.

**Твердження 3.2.** Якщо визначена множина ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$ , множина процесів (3.1), простір початкових станів (3.3), причому  $\{St^{(b)}_i\} \neq \emptyset$ , та виконується (3.6), ті цілі рішень, що приймаються несуперечливі, якщо при цілеспрямованому виконанні процесів справедливо

$$\begin{aligned} \forall St^{(b)}_i, St^{(b)}_i \in \{St^{(b)}_i\}; \forall PR_{i(Le)}^{(S)}, PR_{i(Le)}^{(S)} \in \{PR_{i(Le)}^{(S)}\} i \in I; \\ \forall Le_k, Le_k \in \{Le_k\} | (\{St_{(fc)}^{(e)}\} = \{St_{(ex)}^{(e)}\}). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Справедливість твердження 3.2 очевидна, якщо врахувати, що потрібно для всіх початкових станів всіх процесів на всіх ієрархічних рівнях забезпечити рівність множин очікуваних  $\{St_{(ex)}^{(e)}\}$  та фактичних  $\{St_{(fc)}^{(e)}\}$  просторів станів.

**Зауваження 3.1.** Очевидно, що як випливає з тверджень 3.1 та 3.2, властивості несуперечності можуть виявлятися лише при наявності для процесів властивостей досяжності, що досліджуються.

Розглянемо випадки, коли умови (3.6) не виконуються

$$\mu_{PR}(k_0) < 1, \mu_{St}(k_0) < 1. \quad (3.9)$$

Тоді, з урахуванням положення (3.7) можна сформулювати твердження.

**Твердження 3.3.** Якщо справедливе (3.7), причому  $\{St^{(b)}_i\} \neq \emptyset$ , та виконується умова (3.9), то цілі рішень, що приймаються, досяжні, якщо при цілеспрямованому виконанні процесів справедливо:

$$\begin{aligned} Rch(S) = (Rch'(S) = true) \& ((\forall PR_i^{(S)}, PR_i^{(S)} \in \{PR_i^{(S)}\}) | ((\mu_{PR}(k_0) \geq \\ \geq \mu_{PR}(k_0)^{(ad)}) \& (\mu_{St}(k_0) \geq \mu_{St}(k_0)^{(ad)}))), \end{aligned} \quad (3.10)$$

де  $Rch'(S)$  – вираз (3.8),  $\mu_{PR}(k_0)^{(ad)}, \mu_{St}(k_0)^{(ad)}$  – допустимі значення відповідних функцій належності.

Справедливість (3.10) виходить безпосередньо з (3.9) та визначення функцій належності. [14, 72]. З урахуванням положення (3.7), для виявлення властивостей несуперечності, можна сформулювати таке твердження.

**Твердження 3.4.** Якщо справедливе (3.8), причому  $\{St^{(b)}_i\} \neq \emptyset$ , та виконується умова (3.9), то цілі рішень, що приймаються як несуперечливі, якщо при цілеспрямованому виконанні процесів справедливо

$$\begin{aligned} \overline{Cont}(S) = (\overline{Cont}'(S) = true) \& ((\forall PR_i^{(S)}, PR_i^{(S)} \in \{PR_i^{(S)}\}) | \\ ((\mu_{PR}(k_0) \geq \mu_{PR}(k_0)^{(ad)}) \& (\mu_{St}(k_0) \geq \mu_{St}(k_0)^{(ad)}))), \end{aligned} \quad (3.11)$$

де  $\overline{Cont}'(S)$  – вираз (3.10).

Справедливість (3.11) виходить безпосередньо з (3.10) та визначення функцій належності [14, 72].

### 3.2 Розробка критеріїв досяжності і несуперечності процесів прийняття рішень на нечітких мережевих моделях

Нехай задана модель:

$$\tilde{S}^{(M)}_C(f) = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}^{(M)}_C(f), \tilde{M}_{0C}(f), \tilde{M}_C(f), L\{x_u\}, \tilde{C}, \tilde{V}, \tilde{K} \rangle, \quad (3.12)$$

де  $\tilde{P}$  – множина нечітких позицій;  $\tilde{T}$  – множина нечітких переходів;  $L\{x_u\}, u \in U$  – деякий предикат, віднесений на моделі до множини позицій, переходів, функції інцидентності в просторі станів нечітких взаємодіючих процесів, що визначає додаткові умови виконання переходів;

$$\tilde{F}^{(M)}_C = \tilde{F}_C(f) \cup \tilde{F}_C(Arc) - \quad (3.13)$$

результуюча нечітка функція інцидентності [51] мережі  $\tilde{S}_C(f)$ ;

$$\tilde{F}_C(f) = (\tilde{P} \times \tilde{T}) \cup (\tilde{T} \times \tilde{P}) - \quad (3.14)$$

функція інцидентності мережі, в якій інгібіторні дуги відсутні;

$\tilde{F}_C(Arc)$  – вхідна інцидентність для деякого переходу, що визначається наявністю інгібіторних дуг та функцією кольору

$$Arc(sn)_\alpha \in \{Arc_\beta\}, \alpha \in A, \beta \in B, A \subseteq B; \quad (3.15)$$

$\tilde{C}$  – функція кольору маркера, що визначає в цьому випадку колір кожного з маркерів  $\tilde{M}(\tilde{p}_j)$  для позицій мережі;  $\tilde{V}$  – умови спрацювання переходів в залежності від кольору маркера;  $\tilde{K}$  – місткість маркерів в позиціях з урахуванням  $\tilde{C}$ ;  $\tilde{M}_C(f)_0$  – вектор початкового маркірування;  $\tilde{M}_C(f)$  – вектор поточного маркірування.

Для відображення та формалізації процесів на моделі приймемо досить поширені в наукових публікаціях та дослідженнях, зокрема в роботі [71], такі правила інтерпретації компонент моделі:

– множина нечітких переходів  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  моделі інтерпретує множину дій нечітких процесів, що моделюються;

– множина нечітких позицій  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$  моделі інтерпретує множину нечітких умов  $\tilde{U}_l, l \in L$  виконання множини дій  $\{\tilde{d}_r\}$ ;

– функція кольору маркера  $\tilde{C}$ , інтерпретує множину ознак маркера, що відображає деяку суть об'єкта моделювання;

– динаміка процесів, що моделюються інтерпретується переміщенням нечітких маркерів на множині  $\{\tilde{p}_j\}$  через множину нечітких переходів;



– простір станів  $\{St_i\}$ ,  $i \in I$  динамічних взаємодіючих нечітких процесів інтерпретується множиною векторів маркірування  $\{\tilde{M}_C(f)_s\}$ ,  $s \in S$  множині позицій  $\{\tilde{p}_j\}$  в просторі станів моделі.

Таким чином, прийнявши розглянуту вище інтерпретацію компонент моделі, визначимо критерії виявлення властивостей досяжності на моделі.

**Твердження 3.5.** Якщо визначена множина ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  моделі [59], множина переходів  $\tilde{T}$ , множина позицій  $\tilde{P}$ , множина векторів початкового маркірування мережі  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}$ ,  $s \in S$ , множина векторів кінцевого маркірування  $\{\tilde{M}_C(f)_{es}\}$ ,  $s \in S$ , причому  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset$ , а також для переходів і позицій справедливо відповідно

$$\mu_{t_i}(k_0) \leq 1, \mu_{p_j}(k_0) \leq 1, \mu_{z_j}(k_0) \leq 1, \quad (3.16)$$

де  $\mu_{t_i}(k_0), \mu_{p_j}(k_0), \mu_{z_j}(k_0)$  – значення функцій належності для відповідно переходів, позицій і маркерів, то цілі рішень, що приймаються, досяжні, якщо при моделюванні цілеспрямованого виконання процесів справедливо

$$\begin{aligned} \forall Le_k, Le_k \in \{Le_k\}; \forall \tilde{p}_j, \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}, \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset, s \in S \mid ((\{\tilde{M}_{(ex)}(f)_{es}\} = \\ = \{\tilde{M}_{(fc)}(f)_{es}\}) \& (\mu_{p_j}(k_0) \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(ad)}) \& \\ \& (\mu_{t_i}(k_0) \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(ad)}) \& (\mu_{z_j(k_0) \geq \mu_{z_j}}(k_0)^{(ad)})). \end{aligned} \quad (3.17)$$

Справедливість твердження 3.5 очевидна, якщо врахувати прийняту інтерпретацію моделі і те, що для ненульових початкових маркіровок на всіх ієрархічних рівнях з  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  необхідна рівність множин очікуваних та фактичних просторів станів моделі

$$\{\tilde{M}_{(ex)}(f)_{es}\} = \{\tilde{M}_{(fc)}(f)_{es}\}, \quad (3.18)$$

а також забезпечення мінімально допустимих значень функцій

$$\mu_{t_i}(k_0), \mu_{p_j}(k_0), \mu_{z_j}(k_0). \quad (3.19)$$

**Твердження 3.6.** Якщо визначена множина ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  моделі [59], множина переходів  $\tilde{T}$ , множина позицій  $\tilde{P}$ , множина векторів початкового маркірування мережі  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}$ ,  $s \in S$ , множина векторів кінцевого маркірування  $\{\tilde{M}_C(f)_{es}\}$ ,  $s \in S$ , причому  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset$ , а також для переходів та позицій справедливе (3.16), то цілі рішень, що приймаються, несуперечливі, якщо при моделюванні цілеспрямованого виконання процесів справедливо:

$$\begin{aligned} & \forall Le_k, Le_k \in \{Le_k\}; \forall \tilde{p}_j, \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}; \forall \tilde{M}_C(f)_{0s}, \tilde{M}_C(f)_{0s} \in \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}, \\ & \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset, s \in S \mid ((\{\tilde{M}_{(ex)}(f)_{es}\} = \{\tilde{M}_{(fc)}(f)_{es}\}) \& (\mu_{p_j}(k_0) \geq \\ & \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(ad)}) \& (\mu_{t_i}(k_0) \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(ad)}) \& (\mu_{z_j}(k_0) \geq \mu_{z_j}(k_0)^{(ad)})). \end{aligned} \quad (3.20)$$

Справедливість твердження 3.6 очевидна, якщо врахувати прийняту інтерпретацію моделі і те, що для всіх початкових маркіровок з  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}$ ,  $s \in S$  на всіх ієрархічних рівнях з  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  необхідна рівність множин очікуваних і фактичних просторів станів моделі  $\{\tilde{M}_{(ex)}(f)_{es}\} = \{\tilde{M}_{(fc)}(f)_{es}\}$ , а також забезпечення мінімально допустимих значень функцій (3.19).

### 3.3 Розробка методів аналізу досяжності та несуперечності процесів прийняття рішень на ієрархічних рівнях нечітких мережевих моделей

Розглянемо випадки, коли, принаймні, одна з умов з (3.17) або (3.20) не виконується, досяжність рішень, що приймаються відсутня або має місце властивість суперечності.

Існуючі методи, наприклад [73], вирішуючи ряд важливих задач, принципово не дозволяють враховувати ієрархічність взаємодіючих процесів при аналізі досяжності та несуперечності, що виключає їх з розгляду.

Для усунення вказаної неадекватності в роботі пропонується метод прямого та зворотного аналізу простору станів моделі з метою модифікації моделі та процесів.

Для розв'язання задачі модифікації моделі, з метою забезпечення досяжності цілей рішень, що приймаються, пропонується метод, метою якого є мінімізація відстані між множинами очікуваних  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$  та фактичних  $\{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\}$  векторів поточного маркірування на всіх кроках моделювання взаємодіючих процесів.

Прийнявши як міру нечітку відносну відстань Хеммінга [71]

$$\nu(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{d(\tilde{A}, \tilde{B})}{n}, \quad (3.21)$$

де

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sum_{i=1}^n |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - \mu_{\tilde{B}}(y_i)|, \quad (3.22)$$

$n$  – потужність множин  $|\tilde{A}|, |\tilde{B}|$ , причому  $|\tilde{A}| = |\tilde{B}|$ ,

а в якості: множини  $\tilde{A}$  – множину  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$ , множини  $\tilde{B}$  – множину  $\{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\}$ , тоді шуканий критерій приймає значення

$$\frac{d(\tilde{M}_{C(ex)}(f), \tilde{M}_{C(f)}(f))}{n} \rightarrow \min_{\tilde{F}_C^M}, \quad (3.23)$$

де  $\tilde{F}_C^M$  – вектор обмежень.

Таким чином, метод, що пропонується, передбачає цілеспрямовані дії на основі прямого та зворотного моделювання та аналізу очікуваного та фактичного просторів станів з метою мінімізації потужностей множин

$$|\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}| = |\{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\}|, \quad (3.24)$$

які приводять до порушення адекватності процесів, що моделюються. Метод закінчує функціонування, коли в (3.23)

$$\frac{d(\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}, \{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\})}{n} = 0. \quad (3.25)$$

Розглянемо основний зміст етапів методу, що пропонується.

1. Визначити для всіх переходів  $\forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}$  всіх ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  моделі умови маркірування їх вхідних позицій, значення функцій належності

$$\mu_{t_i(k_0)}, \mu_{p_j}(k_0), \mu_{z_j}(k_0).$$

2. Перевірити умови маркірування і значення функцій належностей на умови дозволених переходів згідно  $\tilde{R}^{(M)}_C(f)$  [53] з урахуванням присутності інгібіторних дуг та виконання функції кольору.

3. Якщо хоч би один перехід  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  не дозволений, то необхідно виконати деякі з дій [64], що забезпечить:

$$-\forall t_i \in T | \mu_{t_i}(k_0) \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(ad)}; \quad (3.26)$$

$$-\forall p_j \in (p_i(in)) | \mu_{p_j}(k_0) \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(ad)}; \quad (3.27)$$

$$-\forall M_{C_{p_j} \in \{p_j(in)\}} \mid M_{C_{p_j}} \geq 1; \quad (3.28)$$

$$-\forall p_j \in (p_i(in)) \mid \mu_{z_j}(k_0) \geq \mu_z(k_0)^{(ad)}. \quad (3.29)$$

4. Якщо дії згідно (3.26) – (3.29) не приводять до дозволеності деяких переходів з  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$ , то необхідно модифікувати структуру моделі на всіх ієрархічних рівнях з метою адекватного відображення логіки взаємодії процесів предметної області та виконання умови (3.17).

**Зауваження 3.2.** Для прийняття рішень згідно з п.1–п.4 методу доцільно, в ряді випадків, використати експертні оцінки.

Розглянемо випадки, коли умова (3.20) не виконується, існує суперечність згідно з розробленими критеріями та справедливо  $\overline{Cont}(S) = true$ .

Для вирішення задачі модифікації моделі з метою забезпечення несуперечності  $\overline{Cont}(S) = true$  цілей прийнятих рішень пропонується метод, який включає такі дії.

1. Визначити для всіх переходів  $\forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}$  всіх ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  моделі умови маркірування їх вхідних позицій, значення функцій належності

$$\mu_{t_i}(k_0), \mu_{p_j}(k_0), \mu_{z_j}(k_0).$$

2. Перевірити умови маркірування та значення функцій належностей на умови дозволеності переходів згідно  $\tilde{R}^{(M)}_C(f)$  [53] з урахуванням присутності інгібіторних дуг та виконання функції кольору.

4. Якщо хоч би один перехід з  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  не дозволений, то необхідно виконати деякі з дій (3.26) – (3.29).

5. Якщо дії згідно з (3.26) – (3.29) не приводять до дозволеності деяких переходів з  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$ , то необхідно модифікувати структуру моделі з метою

виконання (3.17) і забезпечення досяжності  $Rch'(S) = true$  цілей рішень, що приймаються.

6. Якщо умова (3.17) виконується, то необхідно ввести додатково множину векторів поточної очікуваної  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$  і поточної фактичної  $\{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$  маркіровок.

7. Запустити модель на виконання на множині векторів початкових маркіровок  $\{\tilde{M}_c(f)_{0s}\}, s \in S$ .

8. Якщо на деякому кроці моделювання, який визначається зміною векторів поточного маркірування, для деякого вектора з  $\tilde{M}_c(f)_{0s} \in \{\tilde{M}_c(f)_{0s}\}$ , не виконується умова

$$\begin{aligned} & \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}; \forall \tilde{M}_0(f)_s, \tilde{M}_c(f)_{0s} \in \{\tilde{M}_c(f)_{0s}\}, \{M_c(f)_{0s}\} \neq \emptyset, s \in S | \\ & \left( \left( \{M_{C(ex)}(f)_s\} = \{M_{C(fc)}(f)_s\} \right) \& \left( \mu_{p_j}(k_0) \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(ad)} \right) \& \right. \\ & \left. \& \left( \mu_{t_i}(k_0) \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(ad)} \right) \& \left( \mu_{z_j}(k_0) \geq \mu_{z_j}(k_0)^{(ad)} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.30)$$

то необхідно модифікувати структуру моделі на всіх ієрархічних рівнях з метою адекватного відображення логіки взаємодії процесів предметної області і виконання умови (3.30).

9. Дії згідно з п.7 – п.8 виконати для всіх векторів з  $\{\tilde{M}_c(f)_{0s}\}, s \in S$  всіх ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}, k \in K$  до збігу відповідних векторів із множини  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\} \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$  з відповідними векторами із множини  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{es}\}, \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_{es}\}$ .

10. Дії згідно з п.1 – п.9 виконувати до виконання (3.20) і  $\overline{Cont}(S) = true$ .

11. Якщо для деякої поточної маркіровки  $\{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$  при виконанні всіх дій з множині можливих модифікацій не буде виконуватися умова (3.30),

то замість п.п.7–10 виконується зворотний покроковий цілеспрямований аналіз структури моделі та її просторів станів, а саме:

12. Запустити модель на виконання зворотного трасування на множині векторів очікуваних кінцевих маркіровок  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{es}\}, s \in S$ .

13. Якщо на деякому кроці моделювання, який визначається зміною векторів поточного маркірування, для деякого вектора з  $\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s \in \{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$  не виконується умова

$$\begin{aligned} & \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}; \forall \tilde{M}_{C(ex)}(f)_s, \tilde{M}_{C(ex)}(f)_s \in \{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}, \\ & \{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\} \neq \emptyset, s \in S \mid ((\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\} = \tilde{M}_{C(fc)}(f)_s) \& (\mu_{p_j}(k_0) \geq \\ & \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(ad)}) \& (\mu_{t_i}(k_0) \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(ad)}) \& (\mu_{z_j}(k_0) \geq \mu_{z_j}(k_0)^{(ad)})), \end{aligned} \quad (3.31)$$

то необхідно модифікувати структуру моделі на всіх ієрархічних рівнях з метою адекватного відображення логіки взаємодії процесів предметної області і виконання умови (3.31).

14. Дії згідно з п.11–13 виконати для всіх векторів з  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{es}\}, s \in S$  всіх ієрархічних рівнів  $\{Le_k\}, k \in K$  до збігу відповідних векторів з

$$\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}, \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$$

з відповідними векторами з множини

$$\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{0s}\}, \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_{0s}\}.$$

15. Дії згідно з п.1–п. 9 виконувати до виконання (3.20) і  $\overline{Cont}(S) = true$ .

**Зауваження 3.3.** Для прийняття рішень згідно з п.1–п.15 методу доцільно, в ряді випадків, використати експертні оцінки.

Ряд складних об'єктів, до яких насамперед належать газотранспортні, газорозподільні та переробні підприємства, функціонують в умовах підвищеної небезпеки, невизначеності станів технічних засобів реалізації технологічних процесів [60].

Такі об'єкти зазвичай є яскраво вираженими ієрархічними та просторово розподіленими структурами при їх функціонуванні та управлінні.

У зв'язку з цим проблема досяжності та несуперечності в прийнятті рішень є важливою та актуальною.

Для розроблених нечітких моделей, критеріїв і методів запропоновано алгоритмічні та інструментальні засоби застосування їх в практичних реалізаціях. Застосування підходів підтвердили ефективність теоретичних положень і прийнятих практичних рішень на реальних об'єктах.

### **3.4 Підходи до побудови методів виявлення альтернатив на основі мережових моделей в задачах аналізу станів складних технологічних об'єктів**

Проблеми підвищення ефективності використання ресурсів є стратегічними як для окремих держав, так і світової спільноти загалом. Значна частина складних розподілених та ієрархічних об'єктів функціонують в позамежних умовах експлуатаційного ресурсу, вони схильні до впливу навколишнього середовища, суб'єктивного чинника, пов'язаного з тенденцією зниження вимог до професійного рівня користувачів.

У зв'язку з цим задача підвищення достовірності оцінки технічного стану таких складних розподілених об'єктів, а також оперативної локалізації та ліквідації передаварійних і аварійних ситуацій на множині можливих альтернатив набуває виключно важливого значення. У таких системах зазвичай розглядаються, принаймні, дві складові: організаційно-технічне управління та безпосередній контроль стану об'єкта обслуговуючим персоналом. Широке застосування технічних засобів, наприклад, ультразвукових, рентгенівських дефектоскопів та комплексів, засобів на основі прогнозу і аналізу станів об'єкта



з використанням штучних нейронних мереж (ШНМ) та інших перспективних підходів як правило обмежено, а часто і не використовуються в промислових масштабах взагалі.

Складні об'єкти функціонують зазвичай в умовах невизначеності. Знизити її рівень засобами на основі добре досліджених ймовірнісних підходів не завжди вдається, оскільки, в зв'язку з унікальністю таких об'єктів, часто неможливо отримати достовірні статистичні характеристики.

Метою даної роботи є розробка формальних підходів до рішення такого класу задач на основі нечіткої логіки, моделей та методів на основі нейро-фаззи мережевих підходів, положень геоінформаційних технологій. Такі підходи звичайно дозволяють отримати задовільні результати в практичних додатках. Але, як показав аналіз, вони відносно мало досліджені, відомі результати є часто лише постановочними, не доведені до практичних додатків, що і визначає важливість і актуальність досліджень, що пропонуються.

При аналізі процесів прийняття рішень

$$\{PR_i(Le)^{(s)}\}, i \in I$$

в системах, які характеризуються складною, зокрема ієрархічною, взаємодією динамічних процесів, важливою задачею є вибір рішень на множині альтернатив [68, 70]

$$\{Alt_w\}, w \in W$$

за критеріями, які зазвичай визначаються предметною областю.

До них, для випадку технічних систем, доцільно насамперед віднести якість управління [74, 75], показники надійності  $T_0$  і деякі інші. Як обмеження можна розглянути вартісні показники  $\{St_w\}, w \in W$ , часові показники  $\tau_w, w \in W$  та відповідні обмеження, що особливо важливо для систем реального часу.

Тоді вирішення поставленої задачі за критерієм надійності може бути визначене, як знаходження

$$\begin{aligned} T_{0Alt_w} &\rightarrow \max \\ St_w &\leq St^{(ad)}_w, \\ \tau_w &\leq \tau_w^{(ad)}, \\ \mu(x) &\geq \mu(x)^{(ad)} \end{aligned} \quad (3.32)$$

де  $T_0$  – час відмов об'єкта аналізу;  $St^{(ad)}_w$  – max допустиме значення вартісних показників під час розв'язання деякої альтернативи з множини можливих;  $\tau_w^{(ad)}$  – max допустиме значення часу розв'язання альтернативи;  $\mu(x)^{(ad)}$  – min допустиме значення функції належності для процесів деякої альтернативи.

Розв'язок задачі (3.32) можна поширити на задачу вибору деякої підмножини альтернатив

$$\{Alt_{w1}\} \subseteq \{Alt_w\} \quad (3.33)$$

за критеріями

$$\begin{aligned} T_{0Alt_{w1}} &\geq T_{0Alt_{wi}}^{(ad)}, \\ St_w &\leq St_w^{(ad)}, \\ \tau_w &\leq \tau_w^{(ad)}, \\ \mu(x) &\geq \mu(x), \end{aligned} \quad (3.34)$$

де  $T_{0Alt_{wi}}^{(ad)}$  – min допустиме значення показників відмови  $T_0$ .

У цьому разі альтернативи

$$Alt_{w1} \in \{Alt_{w1}\} \quad (3.35)$$

можуть бути впорядковані за критерієм зростання (зменшення)  $T_{0Alt_{w1}}$ . Значення  $S_t^{(ad)}_w, \tau_w^{(ad)}, T_{0Alt_{wi}}^{(ad)}$  визначаються як правило згідно з даними і (або) знаннями експертів.

При цьому необхідно враховувати вимоги узгодження думок експертів [76] і вимог предметної області.

Рішення згідно з (3.32) – (3.35) з урахуванням відповідних обмежень доцільно вирішувати з використанням моделей [51, 59, 53] за умови справедливості положень роботи [67].

### **3.5 Розробка методу вибору альтернатив в складних об'єктах на основі мережевих моделей**

Задача вибору альтернатив в прийнятті рішень складних об'єктів на множині альтернатив є актуальною та відносно мало дослідженою. Особливо це актуальне в об'єктах з явно вираженою ієрархією та (або) розподіленістю, що функціонують в нечіткому просторі станів [51, 59].

У роботах [59, 53] запропоновані і досліджені нечіткі мережеві моделі на основі ієрархії класів нейро-фаззі мереж Петрі. У цих роботах показано, що застосування моделей класів, що розглядаються, багато в чому дозволить вирішити широкий клас прикладних задач. Важливо також враховувати положення роботи [76], де визначені і досліджені умови досяжності і несуперечності, що є по суті одним з основних обмежень на вибір альтернатив.

### Визначення 3.1. Альтернатива

$$Alt_{w1} \in \{Alt_{w1}\}, w \in W \quad (3.36)$$

на мережевих моделях [74, 75], враховуючи їх ієрархічність, визначається деякими визначеними підмножинами інцидентних позицій  $\{p_{j_1}\} \subseteq \{p_j\}$ ,  $j_1 \in I_1$ ,  $J_i \subseteq J$  та дозволених ієрархічних переходів  $\{t_{i_1}\} \subseteq \{t_i\}$ ,  $i_1 \in I$ ,  $I_1 \subseteq I$ , що моделюють процеси прийняття деяких рішень  $PR_i(Le)^{(s)}$  з множини  $PR_i(Le)^{(s)} \subseteq PR_i^{(s)}$ ,  $i \in I$  для досягнення поставленої мети.

Введемо поняття динамічних ієрархічних об'єктів  $(Do(Le)_\alpha)$ ,  $\alpha \in A$ , де  $A$  – множина ієрархічних рівнів  $(Do(Le))$ , які введено для множини позицій  $\{p_i(Le)_\alpha\}$ , переходів  $t_i(Le)_\alpha$ , векторів маркірування  $\{M_{p_j}(Le)_\alpha\}$ .

Тоді сформулюємо таке твердження.

**Твердження 3.7.** Множини інцидентних позицій  $\{p_{j_1}\} \subseteq \{p_j\}$ ,  $j_1 \in I_1$ ,  $J_i \subseteq J$  та дозволених переходів  $\{t_{i_1}\} \subseteq \{t_i\}$ ,  $i_1 \in I$ ,  $I_1 \subseteq I$  при заданому векторі непарної маркіровки  $M_0$ , заданих множинами  $Do(Le)_\alpha$  визначають деяку альтернативу  $Alt_w \in \{Alt_w\}$ ,  $w \in W$ , досягаючи цілей рішень, що приймаються.

Справедливість твердження 3.7 безпосередньо виходить з визначення 3.1 та поняття динамічних ієрархічних об'єктів  $Do(Le)_\alpha$ .

Як впливає з викладеного вище, введення  $Do(Le)_\alpha$  для компонент моделі дозволяє розширити та модифікувати методи і алгоритми, засновані на побудові дерева досяжності [77], на випадок ієрархії класів нейро-фаззі мережевих моделей [59, 53].

Для більш повного обліку особливостей об'єктів, що функціонують в нечіткому просторі станів та характеризуються просторовою компонентою

[78], в роботі запропоновано розширення можливостей методу виявлення альтернатив на основі гібридизації моделей.

**Твердження 3.8.** Якщо простір стану складного розподіленого технологічного об'єкта є нечітким, розподіленим у просторі та розвивається в умовах невизначеності, то модель  $\tilde{S}_\Sigma$ , яка інтегрує ієрархію моделей  $\{\tilde{S}^{(M)}_C(f)_\alpha\}, \alpha \in A$ , модель нечіткої бази знань  $\tilde{S}^{(K)} = \{if / then\}$ , множина геоінформаційних моделей  $\{S^{(GIS)}\}$ , що відображають розвиток процесів в просторі з механізмами їх синхронізації, є засобом, що адекватно описує процеси аналізу стану об'єктів.

Тоді модель має вигляд

$$\tilde{S}_\Sigma = \cup(\tilde{S}^{(M)}_C, \tilde{S}^{(K)}, S^{(GIS)}), \quad (3.37)$$

причому символ « $\cup$ » в цьому випадку визначає деяку додаткову функціональність, що визначається особливостями механізмів синхронізації прямої і зворотної взаємодії ієрархічних рівнів.

На рис. 3.1, з урахуванням положень твердження 3.8, прийняті такі позначення: МНБЗ – модель нечіткої бази знань [72]  $\tilde{S}^{(K)} = \{if / then\}$ ; (M1k, M2n, M3m) – ієрархія мережевих моделей [67]  $\{\tilde{S}^{(M)}_C(f)_\alpha\}, \alpha \in A$ ; ГеоІМ=({x, y, z}, R(x, y, z), Pr) – геоінформаційна модель [79]  $\{S^{(GIS)}\}$ .

Початковими даними для функціонування моделі та методу на її основі є нормативна база предметної області, дані та знання експерта (експертів). Початкові дані про стан об'єкта оперативно формуються як наслідок аналізу і прогнозних оцінок на технологічному об'єкті.

Як доцільність включення моделі [79] в структуру гібридної моделі (3.1) було взято до уваги, що географічна інформаційна модель і системи на її основі [70] є сучасною комп'ютерною технологією для просторового моделювання, аналізу, управління та відображення об'єктів.

Дані в таких моделях та системах представлені у вигляді деякої кінцевої множини шарів, які об'єднані та взаємодіють на основі їх географічного розташування, що важливо для реалізації розподілених та ієрархічних систем.

Узагальнено функціонування методу пошуку альтернатив на множині критеріїв і обмежень можна представити у вигляді такої процедури (рис. 3.1).

Наведено основні етапи запропонованого методу пошуку альтернатив:

- на основі даних *нормативної бази*, даних і знань *експерта* формується МНБЗ;

- фактичні дані про стан об'єкта та наявність альтернатив на множині критеріїв надходять, як результат моделювання, від ієрархічної мережевої моделі, геоінформаційної моделі ГеоІМ, безпосередньо від технологічного об'єкта управління;

- з використанням логічних процедур нечіткого логічного виведення формується множина альтернатив, а також рекомендації користувачеві за оцінкою стану об'єкта і можливими діями з усунення потенційно аварійних (передаварійних) ситуацій;

- можливі ітерації з уточнення або модифікації можливих рішень відображені на схемі (рис. 3.1).

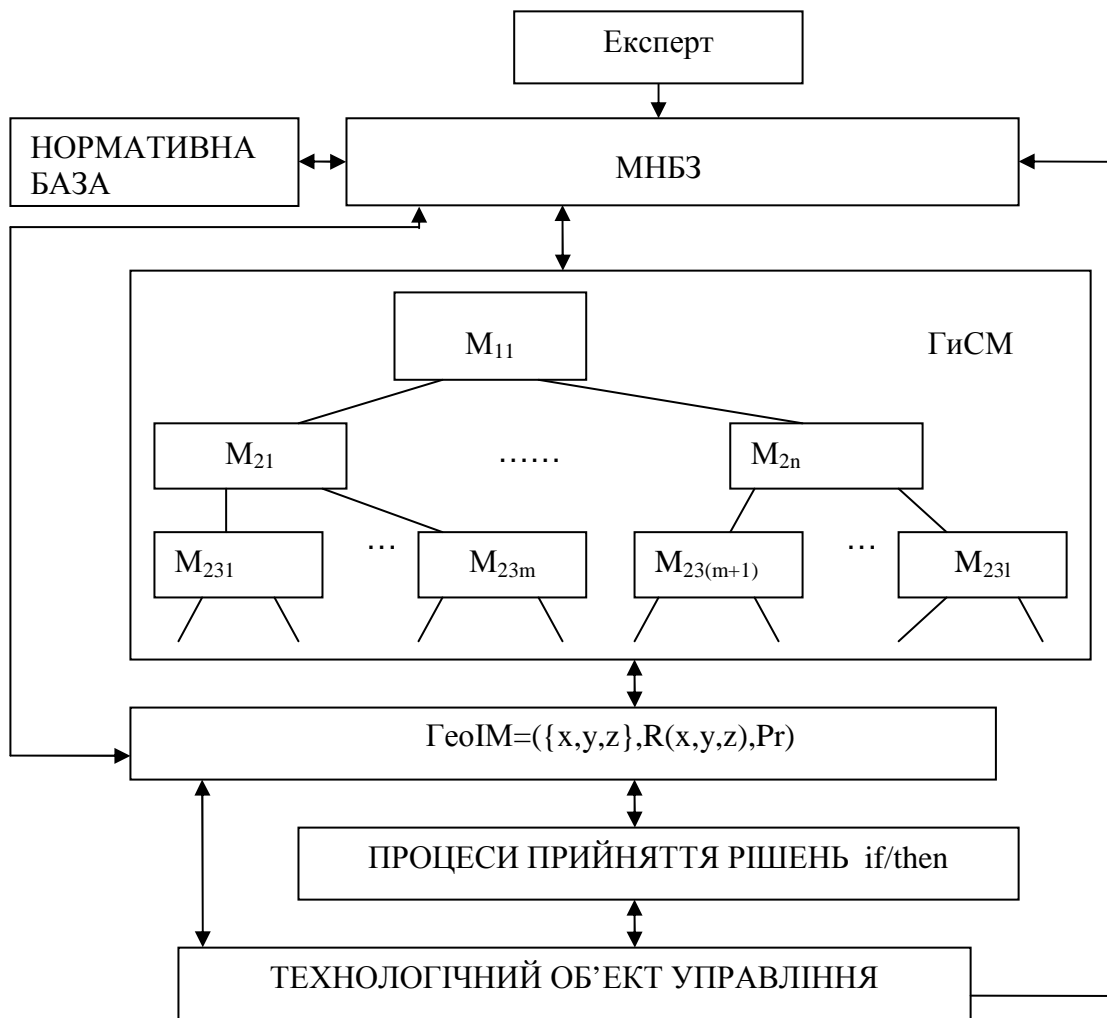


Рис. 3.1 – Структура моделі

Такий підхід багато в чому дозволяє мінімізувати зусилля з оперативного достовірного вирішення поставленої задачі.

### 3.6 Розробка та дослідження алгоритму аналізу нечітких процесів мережевими моделями на основі ієрархії класів нейро-фаззі мереж Петрі

Введемо деякі положення, які доцільно використати при побудові алгоритму на основі запропонованого вище методу. У роботі він розглядається як розширення відомого алгоритму побудови дерева досяжності [77] на мережах Петрі.

До цих положень віднесемо насамперед таке:

1. Якщо існує мережа  $S$  з вектором  $M_0$ , множина позицій  $P$ , множина переходів  $T$ , то кількість можливих маркіровок  $|\{M_0\}|$  дорівнює потужності множин дозволених переходів  $|T_r|$ .

2. Кожне маркірування  $M$  дозволяє дозволеним переходам створити нову маркіровку  $M^|$ .

3. Процес зміни маркіровки може бути поданим у вигляді дерева. Причому його вершини – деякі маркіровки  $M$  з  $\{M\}$ , а дуги включають дозвалені переходи  $t_i \in T$ , внаслідок виконання цих переходів і формуються маркіровки  $M^|$ .

4. Умови дозволених переходів  $t_i \in T$  визначаються з урахуванням виконання умов маркіровок вхідних позицій і кольору маркерів, предиката, показників нечіткості.

5. Для забезпечення закінчення дерева, при можливості нескінченного виконання деяких переходів  $\exists \tilde{t}_i, \tilde{t} \in \tilde{T} \mid r \rightarrow \infty$  вводиться [77] елемент  $\omega$ , що має властивості:  $\omega \pm r = \omega; r < \omega; r \in N; \omega \leq \omega$ . Знак  $\sim$  над символом означає, що відповідний елемент розглядається як нечіткий.

Тоді алгоритм можна представити у вигляді:

Крок 1. Визначити початкову маркіровку  $\tilde{M}_0$  для  $(Do(Le))_\alpha$  типу «позиція», як корінь дерева і вмістити його як «нове» маркірування.

Крок 2. Поки існують «нові» маркіровки  $\tilde{M}$  виконуються такі дії:

Крок 2.1. Вибрати нове маркірування  $\tilde{M}$ , як результат виконання  $(Do(Le))_\alpha$  типу «перехід».

Крок. 2.2. Якщо маркіровка  $\tilde{M}$  збігається з одним з маркірованих станів на шляху від кореня дерева до даної маркіровки  $\tilde{M}$ , то позначити її як «старе» і перейти до іншого «нового» маркірування  $\tilde{M}$ .



Крок 2.3. Якщо при маркіруванні  $\tilde{M}$  не існує дозволених  $(Do(Le))_\alpha$  типу «перехід», то відмітити це маркірування як «тупикове». Це маркірування  $\tilde{M}$  може бути таким саме «термінальним» і визначати кінцеву маркіровку.

Крок 2.4.  $(Do(le))_\alpha$  доти, поки для маркіровок  $\tilde{M}$  існують дозволени  $(Do(le))_\alpha$  типу «перехід» для кожного з них виконати такі дії:

Крок 2.4.1. Знайти маркіровані  $\tilde{M}^|$ , які замінюють маркірування  $\tilde{M}$ , як результат виконання  $Do_{\tilde{t}_i} \in \{Do_{\tilde{t}_i}\}'$ .

Крок 2.4.2. Якщо на шляху від кореня до маркірування  $\tilde{M}$  існує маркірування  $\tilde{M}''$  таке, що  $\exists pj \in P \mid (\tilde{M}(pj) \geq \tilde{M}''(pj)) \& (\tilde{M} \neq \tilde{M}'')$ , то це визначається як покриття маркірування  $\tilde{M}''$  і маркірування  $\tilde{M}''(pj) \in \tilde{M}''$  замінюємо на  $\omega$ . Причому ця дія здійснюється для всіх  $Do_{pj}$ , в яких  $\tilde{M}''(pj) \geq \tilde{M}''(pj)$ .

Крок 2.4.3. Прийняти  $\tilde{M}'$  за вершину, з'єднати маркірування  $\tilde{M}$  з маркіруванням  $\tilde{M}'$  дугою, яка містить  $Do_{t_i}$ , та помітити маркірування  $\tilde{M}'$  як «нове».

Крок 3. Кроки 2.1–2.4.3 виконати для всіх можливих маркіровок мережі.

Крок 4. Сформувати множини  $\{Dot_i\}$ ,  $\{Dop_j\}$ , які визначають множини маркіровок  $\{\{M_l\}, l \in L\}$  при переміщенні маркера від кореня дерева до деякого термінального об'єкта  $Do_{pj}$ .

Крок 5. Для множин визначити:

- вектор

$$(\mu'(Do_{pj} = Do_{pj} \text{ терм}) = \mu'(Do_{pj} = Do_{pj} \text{ корінь})) \circ \circ(\mu'(Do_{pj} \text{ терм}, Do_{pj} \text{ корінь})) ;$$

- використовуючи алгоритми дефаззифікації, знайти значення аргументу і відповідно  $\mu$  терм.

Крок 6. Для множин  $\{Do_{t_i}\}$  і  $\{Do_{p_j}\}$  знаходимо результуючі значення  $\tau_\Sigma, T_\Sigma, St_\Sigma$ .

Крок 7. За наявності альтернатив  $\{Alt_{w1}\} \neq \emptyset$ ,  $w \in W$ , вирішити задачі (3.32), (3.34) і сформувати рекомендації по шляхах прийняття рішень на множинах альтернатив.

У додатках важливо визначити формати  $Do$ . Введемо мінімально можливі, як показав аналіз, формати деяких об'єктів  $Do$ .

- формат  $Do$  для позиції  $p_j \in P$  :

$$\begin{aligned} < j_\alpha; p_j \in \{p_j(in)^s\}; \mu_{p_j}; \mu_{pi}(x_0), M_0; \{t_j(in)_\alpha\}; \{t_j(out)_\alpha\}; \\ \{t_j^{(ing)}(in)_\alpha\}; C_{p_j}^{(ing)}; C_{p_j}; \{t_j(in)\}; \{t_j(out)\}; ИНС; Pr^{(xyz)}; M_{p_{jc}} >, \end{aligned} \quad (3.38)$$

де компоненти  $Do$  приймають такі значення:

$j_\alpha$  – номер позиції рівня;

$p_j \in \{p_j(in)^s\}$  – приймає значення згідно з

$$\begin{cases} 1, \text{ if } p_j \in \{p_j(in)^s\}, \\ 0, \text{ if } p_j \notin \{p_j(in)^s\}; \end{cases}$$

$p_j \in \{p_j(out)^s\}$  – приймає значення згідно з

$$\begin{cases} 1, \text{ if } p_j \in \{p_j(out)^s\}, \\ 0, \text{ if } p_j \notin \{p_j(out)^s\}; \end{cases}$$

$\mu_{p_j}$  – функція належності даного об'єкта;

$\mu_{pi}(x_0)$  – значення функції приналежності даного об'єкта;

$M_0$  – вектор початкової маркіровки;

$\{t_j(in)_\alpha\}$  – множина вхідних переходів позиції від деякого суміжного рівня ієрархії, що розглядається;

$\{t_j(out)\}$  – множина вихідних переходів від позиції до деякого суміжного рівня ієрархії, що розглядається;

$\{t_j^{(ing)}(in)_\alpha\}$  – множина вхідних інгібіторних дуг від переходів до позиції;

$C_{p_j}^{(ing)}$  – функція кольору інгібіторних дуг;

$C_{p_j}$  – функція кольору дуг;

$\{t_j(in)\}$  – множина вхідних переходів до позиції;

$t_j(out)\}$  – множина вихідних переходів позиції;

$ШНМ = \begin{cases} 1, if ШНМ = true, \\ 0, if ШНМ = false; \end{cases}$  – параметр наявності ШНМ у процедурі

маркірування даної позиції;

$Pr^{(xyz)}$  – параметр відображення деякого простору, віднесеного до даної позиції;

$M_{p_{jc}} = \begin{cases} 1, if Mp_j \geq 1, \\ 0, if Mp_j = 0; \end{cases}$  – параметр маркірування позиції;

– формат  $Do$  для переходу  $t_i \in T$ :

$$\begin{aligned} < i_\alpha, \{p_i(in)_\alpha\}; \{p_i(out)_\alpha\}; \{p_i^{(ing)}(out)_\alpha\}; \{p_i(in)\}; \{p_i(out)\}; \\ \tau_{wi}; Sti; To_i; \mu_{ti}; Pr_i; Ur; Pr^{(xyz)} > , \end{aligned} \quad (3.39)$$

де компоненти  $Do$  приймають такі значення:

$i_\alpha$  – номер переходу  $i$  рівня  $\alpha$ ;

$\{p_i(in)_\alpha\}$  – множина вхідних позицій до переходу від деякого суміжного рівня ієрархії, що розглядається;

$\{p_i(out)_\alpha\}$  – множина вихідних позицій переходу до деякого суміжного рівня ієрархії, що розглядається;

$\{p_i^{(ing)}(out)_\alpha\}$  – множина вихідних інгібіторних дуг від переходу до позиції;

$\{p_i(in)\}$  – множина вхідних позицій переходу, що розглядається;

$\{p_i(out)\}$  – множина вихідних позицій переходу, що розглядається;

$\tau_{wi}$  – параметр часу, віднесеного до переходу;

$St_i$  – вартісної показник, віднесений до переходу;

$T_0$  – показник надійності (напрацювання на відмову) засобів, що реалізують відповідні процеси;

$\mu_{ii}$  – функція належності;

$$Ur = \begin{cases} 1, & \text{if } Ur = true, \\ 0, & \text{if } Ur = false; \end{cases}$$

$Pr_i$  – предикат, віднесений до умови дозволу переходу;

$Pr^{(xyz)}$  – параметр відображення деякого простору, віднесеного до даного переходу.

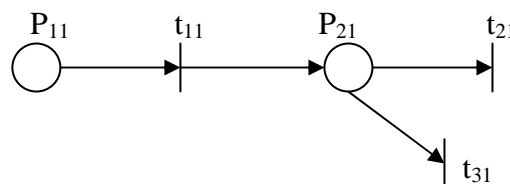


Рис. 3.2 – Фрагмент моделі

Наведемо приклад моделювання процесів з використанням запропонованого методу і алгоритму для фрагмента деякого рівня мережевої моделі (рис. 3.2).

З урахуванням введених  $Do$ , процес моделювання можемо представити у вигляді:

- початковий стан (рис. 3.3)

p1	1	1	0			1;				0	0	{t11}	0	x;y;z	1
1	1			$\mu_{p_j}$	$\mu_{p_i}(x_0)$	0	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$						

t11	11	$\emptyset$	$\emptyset$	{p1}	{p2}	$\tau_{wi}$	St <sub>i</sub>	T <sub>0</sub>	$\mu_{ti}$	1	Pr <sub>i</sub>	x;y;z
-----	----	-------------	-------------	------	------	-------------	-----------------	----------------	------------	---	-----------------	-------

p21	2	0	0			1;	$\emptyset$		$\emptyset$	0	0	{t11}	{t21}	0	x;y;z	0
	1			$\mu_{p_j}$	$\mu_{p_i}(x_0)$	0		$\emptyset$					{t31}			

Рис. 3.3 – Початковий стан фрагмента моделі

- подальший стан фрагмента моделі (після спрацювання дозволеного переходу t11 ) (рис. 3.4)

p11	1	1	0			0;			$\emptyset$	0	0	{t11}	0	x;y;z	0
	1			$\mu_{p_j}$	$\mu_{p_i}(x_0)$	1	$\emptyset$	$\emptyset$							

t11	11	$\emptyset$	$\emptyset$	{p11}	{p21}	$\tau_{wi}$	St <sub>i</sub>	T <sub>0</sub>	$\mu_{ti}$	1	Pr <sub>i</sub>	x;y;z
-----	----	-------------	-------------	-------	-------	-------------	-----------------	----------------	------------	---	-----------------	-------

p21	2	0	0			0;	$\emptyset$			0	0	{t1	{t21}	0	x;y;	1
	1			$\mu_{p_j}$	$\mu_{p_i}(x_0)$	1		$\emptyset$	$\emptyset$			1}	{t31}		z	

Рис. 3.4 – Подальший стан фрагмента моделі

Внаслідок виконання алгоритму формується множина маркірованих позицій: в цьому випадку  $\{p_{11}, p_{21}\}$  на множині виконаних переходів  $\{t_{11}\}$ .

Визначимо показники нечіткості, як рішення [72] для фрагмента мережі (рис. 3.2) у вигляді [51]

$$\mu'_{\tilde{p}_{21}} = \mu'_{\tilde{p}_{11}} \circ \mu(\tilde{p}_{11}, \tilde{t}_{11}, \tilde{p}_{21}) \quad (3.40)$$

з подальшою дефаззіфікацією [51] отриманих розв'язків (3.40) і знаходженням чітких значень аргументу і функції належності.

Часові показники реалізованих процесів можуть бути визначені, як знаходження

$$\tau_{\Sigma} = \sum_{\substack{i \in I \\ \alpha \notin A}} \tau_{i\alpha}. \quad (3.41)$$

Показники обчислень формуються як знаходження

$$(T_{0\Sigma})^{-1} = \sum_{\substack{i \in I \\ \alpha \in A}} \frac{1}{T_{01}}. \quad (3.42)$$

Розв'язки (3.40), (3.41), (3.42) є такими, що складають розв'язок задач (3.32), (3.34) за наявності альтернатив  $Alt_w \neq 0$ .

**Зауваження 3.4.** Результат функціонування ШНМ у складі нейро-фаззі мереж Петрі [51] визначає додаткові умови маркірування позицій  $Pi \in P$  мережі.

Метод, що пропонується, значною мірою ефективний і реалізовується в запропонованій модифікації алгоритму побудови дерева досяжності.

Верхня оцінка обчислювальної складності реалізації алгоритму близька до квадратичної і може бути представлена у вигляді

$$Z = k(\max \{ |Dopj|, |Doti| \})^2, \quad (3.43)$$

де  $k = k1 \cdot k2$ ,

$k1$  – визначається форматом елементів динамічних об'єктів;

$k2$  – визначається швидкодією і архітектурою комп'ютерних засобів.

У одній з версій інструментальних засобів в реальних дослідженнях обчислювальна складність (3.43) звичайно не перевищувала (1-10) с.

### **Висновки до розділу 3**

Відповідно до поставленого в даній роботі комплексу задач, що вирішуються в розділі, розглянуті та вирішені такі задачі:

1. Сформульовано постанову задачі досяжності цілей, несуперечність рішень, що приймаються, як результату аналізу нечіткого простору станів і структури моделі.

2. Сформульована і вирішена задача вибору альтернатив в системах, що характеризуються ієрархічністю процесів. Ця задача розглядається як задача оптимізації на множині критеріїв і обмежень в нечіткому просторі станів мережевої моделі. Визначено, що критеріями оптимізації можуть бути показники надійності і (або) якості, а як обмеження доцільно вибрати показники нечіткості, вартості, часу тощо.

3. Уперше запропоновано та обґрунтовано метод аналізу простору станів і виявлення властивостей досяжності і несуперечності при взаємодії нечітких ієрархічних процесів. Метод включає прямий і зворотний покроковий цілеспрямований аналіз нечіткого простору станів і структури моделі з урахуванням критеріїв досяжності і несуперечності, що дозволяє скоротити часові та ресурсні витрати з одночасним підвищенням достовірності виявлення, локалізації і усунення відповідних неадекватностей.

4. Отримав подальший розвиток метод аналізу простору станів при взаємодії процесів в задачах вибору альтернатив складних об'єктів, який відрізняється від існуючих додатковим формуванням компонент, що відображають ієрархічність, просторові характеристики і синхронізацію для нечітких динамічних об'єктів. Метод дозволяє знизити витрати ресурсів при рішенні задач аналізу і оцінки технічного стану об'єктів і процесів на множині відношень «умова—дія».

5. Сформульовано і обґрунтовано критерії виявлення властивостей досяжності та несуперечності, представлених нечіткою мережевою моделлю, які відрізняються тим, що процеси реалізуються на деякій множині ієрархічних

рівнів моделі і дозволяють підвищити достовірність прийняття рішень за рахунок структурованого аналізу особливостей взаємодії процесів моделювання.

6. Запропоновано та досліджено алгоритм аналізу нечітких ієрархічних процесів, який є модифікацією і розширенням алгоритмів побудови дерева досяжності на ієрархію класів нейро-фаззі моделей. Визначено, що верхня оцінка обчислювальної складності алгоритму близька до квадратичної і залежить від розмірності задачі, формату динамічних об'єктів і параметрів обчислювальних ресурсів.

7. Перспективним напрямком застосування теоретичних положень роботи є оцінка станів об'єктів, що функціонують в умовах підвищеної небезпеки, невизначеності стану технічних засобів.



## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕТОДИ НАСТРОЮВАННЯ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ В ЗНАННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

#### **4.1. Прикладні аспекти моделювання нечітких процесів в складних системах**

В наш час велике значення набуває використання інформаційних систем прийняття рішень для розв'язання об'ємних, трудно формалізуємих задач в різних предметних областях. Ці задачі характеризуються, як правило, відсутністю або складністю формальних алгоритмів рішення, неповною та нечіткою вихідною інформацією, нечіткістю цілей досягнення. Дані особливості приводять до необхідності використання в процесі прийняття рішення знань, отриманих від експерта в предметній області, та розробки інтелектуальних систем прийняття рішень, які здійснюють збір та управління цими знаннями, а також приймають рішення про оптимальний спосіб досягнення цілей в умовах неповноти та нечіткості.

Інтелектуальні системи прийняття рішень, що здібні формалізувати нечітку інформацію та обробити її в рамках нечітких алгоритмів, отримали назву нечітких інтелектуальних систем прийняття рішень в умовах невизначеності. Такі системи зручно використовувати для рішення задач моделювання і прийняття відповідальних рішень в різних предметних областях. Важливим фактором для підвищення вірогідності рішень, зниження моментів суб'єктивного характеру, що актуально для розглянутих областей, є застосування математичних методів [80, 81, 82], включаючи м'які обчислення.

В даному розділі розглянуто питання підвищення вірогідності прийняття рішень в галузі оцінювання простору станів складних об'єктів. Існує багато публікацій, що містять опис автоматизації процесів збору та оброблення інформації, на основі яких розроблено спеціалізовані експертні системи.

Особливістю існуючих структур, побудованих за допомогою нечітких мереж Петрі [50, 83], є можливість представлення нечітких процесів та динаміки їх взаємодії. До недоліків таких систем відносять відсутність можливості обліку множини параметрів, показників і характеристик, без яких трудно уявити реальні процеси практичних реалізацій. Крім того, обмежено можливість завдання показників нечіткості маркірування і компонент функції інцидентності, що істотно обмежує можливості дослідника.

Сучасні розробки також орієнтовані на наявність інформації в глобальній мережі Internet.

В [84] описано метод, розроблений з використання новітніх досягнень в області інтелектуальних технологій, що має істотні переваги відносно існуючих структур щодо універсальності. За допомогою цього методу [85, 86] було запропоновано структуру і описано функції інтелектуальних засобів прийняття рішень.

В цьому розділі відображено прикладні аспекти моделювання нечітких процесів прийняття рішень, які містять наукові результати [84, 85, 86].

Необхідно створити новий клас розширених інтерпретованих нечітких мережі Петрі, вільний від вказаних вище недоліків. Ці структури повинні характеризуватися [87]:

- можливістю створення нечітких мережевих моделей, що мають природну інтерпретацію, простоту опису і моделювання взаємодіючих нечітких динамічних процесів, визначених на безлічі стосунків "умова-дія" з урахуванням реальних параметрів, характеристик, показників і обмежень предметної області;
- формальним представленням критеріїв рішення прикладних і теоретичних завдань;
- адаптацією класу задач до предметної області;
- можливістю рішення комплексу поставлених задач як єдиної проблеми створення моделей, критеріїв, методів, інтелектуальних технологій і

ефективних інструментальних засобів з використанням сучасних інформаційних технологій і запропонованих формальних критеріїв.

**Підходи до рішення поставленої задачі.** Нехай задано нечіткий динамічний об'єкт (НДО). Під НДО будемо розуміти взаємодіючі об'єкти нечітких мережових моделей, які створюються в процесі моделювання, характеризуються стійкою структурою, мають хоч би один нечіткий атрибут, а зміст атрибутів і властивостей змінюється в часі згідно з динамікою розвитку змодельованих процесів.

Нехай НДО описується такими елементами:

$\tilde{P}_j(in)$	$\tilde{t}_i$	$\tilde{P}_j(out)$	$\mu$	$\Delta\mu_i$	X	Y	Z	$M_{p_j}$
-------------------	---------------	--------------------	-------	---------------	---	---	---	-----------

де  $\tilde{P}_j(in)$  - значення вхідної інформації;

$\tilde{t}_i$  - значення дії;

$\tilde{P}_j(out)$  - значення вихідної інформації;

$\mu$  - значення функції належності вхідного сигналу;

$\Delta\mu_i$  - інтервальне значення функції належності, задане у вигляді графіку  $\Delta\mu_i(x)$ ;

X, Y, Z - координати об'єкту в географічній інформаційній системі (ГІС);

$M_{p_j}$  - маркіровка при спрацьовуванні сигналу.

ГІС – це системи, призначені для збору, зберігання, аналізу і графічної візуалізації просторових даних і пов'язаної з ними інформації про представлених в ГІС об'єктах. Іншими словами, це інструменти, що дозволяють користувачам шукати, аналізувати і редагувати цифрові карти, а також додаткову інформацію про об'єкти. Прикладами таких ГІС являються програми ArcGIS, ArcPad [88].

Нехай є деяка функція  $\Delta\mu_1(x)$ , яка описується залежністю виду

$$y_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4.1)$$

і функція  $\Delta\mu_2(x)$ , яка описується залежністю  $y_2(x) = 1 - e^{-k(x-f)^2}$ .

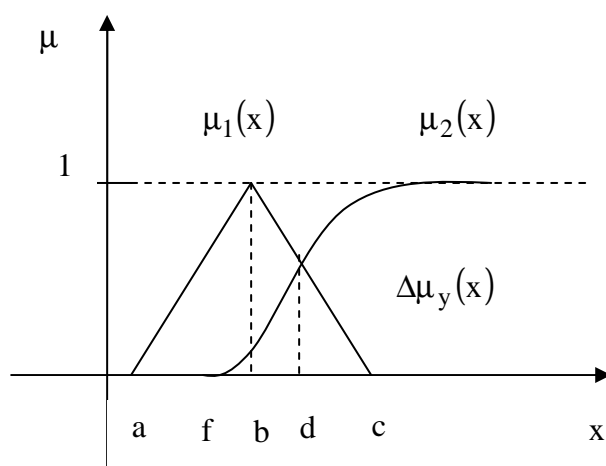


Рис. 4.1 – Графічне представлення перетину двох інтервальних функцій належності

Результуюче значення  $\Delta\mu_y(x)$  знаходитиметься в межах «більше ніж  $\Delta\mu_1(x)$  і менше, ніж  $\Delta\mu_2(x)$ ». Як показано на рис. 4.1, перетин двох інтервальних функцій належності  $\Delta\mu_1(x)$  і  $\Delta\mu_2(x)$  утворює область перетину, площа якої описується фігурою  $fdc$ . В даному випадку для визначення значення  $\Delta\mu_y(x)$  доцільно і зручно використовувати принцип «центру тяжіння (мас)», який дозволяє отримати необхідний результат при рішенні такого класу задач:

$$\Delta\mu_y(x) = \frac{\sum_{i=0}^I \Delta\mu_i(x) S_i}{\sum_{i=0}^I S_i}, \quad (4.2)$$

де  $\Delta\mu_y(x)$  - значення результуючої інтервальної функції належності;

$\Delta\mu_i(x)$  - значення інтервальних функцій належності;

$S_i$  - площа області перетину.

**Побудова моделі на основі нечіткої інтервальної логіки.** Під нечітким інтервальним висловлюванням  $\tilde{d}$  ми розуміємо висловлювання, міру істинності якого  $\mu(d)$  визначається парою  $(\mu_1, \mu_2)$ , де  $0 \leq \mu_1 \leq \mu(d) \leq \neg\mu_2$ , що змістовно означає, що міра вірогідності висловлювання  $d$  не менша за  $\mu_1$ , але і не більша за  $\neg\mu_2$ , де  $\neg$  - будь-яка безперервна функція.

Нехай  $\tilde{d}_1$  і  $\tilde{d}_2$  - нечіткі інтервальні висловлювання, міра істинності яких визначається парами  $\mu_1(d_1); \mu_2(d_1)$  і  $\mu_1(d_2); \mu_2(d_2)$  відповідно. Тоді під мірами вірогідності висловлювань  $d_1 \wedge d_2, d_1 \vee d_2$  і  $\neg d_1$  розуміємо відповідно пари  $(\mu_1(d_1)T\mu_1(d_2); \mu_2(d_1)S\mu_2(d_2)), (\mu_1(d_1)S\mu_1(d_2); \mu_2(d_1)T\mu_2(d_2))$  і  $(\mu_2(d_1); \mu_1(d_1))$ , де  $T$  і  $S$  - деякі безперервні функції.

Нечіткі інтервальні мережі Петрі (НІСП) визначимо як набір символів [83]:

$$\tilde{S} = \{\tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}, \tilde{M}_0, \tilde{D}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{\Lambda}\}, \quad (4.3)$$

де  $\tilde{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  - кінцева множина позицій;

$\tilde{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  - кінцева множина переходів;

$$\tilde{F} = \tilde{I} \cup \tilde{O}, \quad (4.4)$$

де  $\tilde{I} : \tilde{T} \rightarrow \tilde{P}^\infty$  – функція, яка ставить у відповідність кожному переходу множини позицій, що до нього входять;

$\tilde{O} : \tilde{T} \rightarrow \tilde{P}^\infty$  – функція, яка ставить у відповідність кожному переходу множини позицій, що з нього виходять;

$\tilde{M}_0 : \tilde{P} \rightarrow [0;1]$  – початкова маркіровка мережі;

$\tilde{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  – кінцева множина висловлювань;

$\tilde{B} : \tilde{P} \rightarrow \tilde{D}$  – відповідність між позиціями та висловлюваннями;

$\tilde{C} : \tilde{T} \rightarrow [0;1]$  – степінь впевненості;

$\tilde{\Lambda} : \tilde{T} \rightarrow [0;1]$  – граничні значення.

Початкову маркіровку мережі  $\tilde{M}_0$  (4.3) може бути отримано наступним чином. Спочатку всім позиціям  $p_i$  мережі за умовчанням ставиться у відповідність число 0, що змістовно означає, що степені вірогідності  $\mu$  висловлювань  $d$ , які відповідають цим позиціям, не менше 0, тобто  $\tilde{M}_0 = 0$  та  $\mu(p_i) = 0$ . Якщо в базі даних є степінь вірогідності висловлювання  $d_i$   $\mu(d_i) = (\mu_1(d_i); \mu_2(d_i))$ , то полагасмо  $\mu(p_i) = \mu_1(d_i)$  та  $\mu(\neg p_i) = \mu_2(d_i)$ , де  $\neg p_i$  - позиція, яка відповідає висловлюванню  $\neg d_i$ .

Таким чином отриманий набір функцій  $\{\mu(p_1), \mu(p_2), \dots, \mu(p_m)\}$  утворює початкову маркіровку  $\tilde{M}_0$  з наступним моделюванням та модифікацією на деякій множині маркіровок  $\{\tilde{M}_j\}$ ,  $j \in J$ . Такий підхід, на відмінність від класичної мережі Петрі, реалізує розповсюдження маркіровок на множину  $\{\tilde{M}_j\}$ .

Виходячі з поставленої задачі, має сенс використовувати такі функції належності:

- трикутну функцію належності (рис. 4.2)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4.5)$$

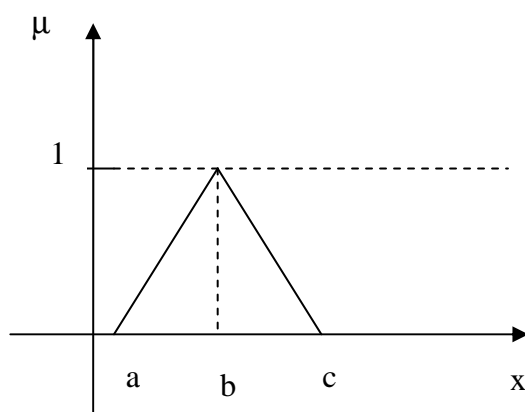


Рис. 4.2 – Графічне представлення трикутної функції належності

- трапецієвидну функцію належності (рис. 4.3)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & b \leq x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d, \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (4.6)$$

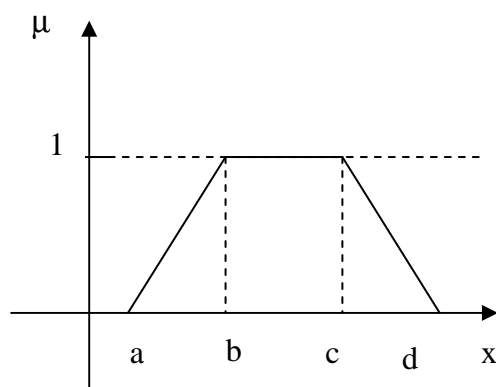


Рис. 4.3 - Графічне представлення трапецієвидної функції належності

- симетричну гауссову функцію належності (рис. 4.4)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{2(x-a)^2}{(b-a)^2}, & a < x \leq \frac{a+b}{2}, \\ 1 - \frac{2(x-a)^2}{(b-a)^2}, & \frac{a+b}{2} < x < b, \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (4.7)$$

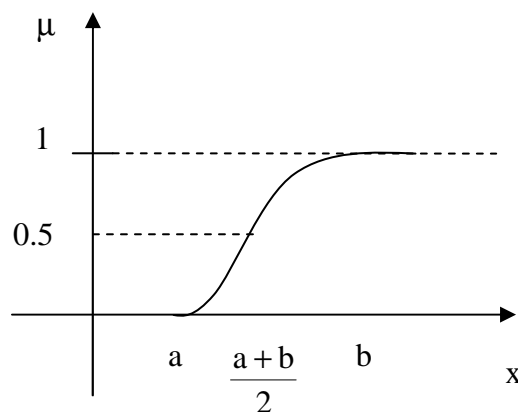


Рис. 4.4 – Графічне представлення гауссової функції належності

Степені впевненості  $\tilde{C}$  експертів використовують при моделюванні висловлювань для отримання нових ступенів вірності на основі функцій належності (4.5 - 4.7). Це дає додаткову інформацію про ступінь вірності наслідків при вірності посилок рівних одиниці.

**Моделювання процесів інтелектуальних систем прийняття рішень в практичних реалізаціях.** З застосуванням підходів, описаних вище і в [84, 85, 86], було побудовано модель вибору кращого рішення(достовірного) в деякому конкретному змісті [84]. Представимо етапи методу.



Структурна схема рішення поставленої задачі [84] містить 12 основних блоків, які виконують ряд функцій [86] та забезпечують роботу методу в цілому, реалізуючи наступну стратегію:

1. Система моніторингу, яка забезпечує роботу системи в діалоговому режимі;

2. Перший етап аналізу стану об'єкту дозволяє за допомогою логічного виводу на основі суб'єктивних даних отримати множину рішень  $D_{ij}^{(1)}$  з визначеними коефіцієнтами впевненості  $KU_{ij}$  та наступним уточненням їх стану на множині рішень  $D_{ff}^{(2)}$ ,  $D_{lj}^{(3)}$ ,  $D_{sj}^{(4)}$  або видає висновок про відсутність будь-якого рішення з класу задач  $\tilde{D}_{закл}$ , який вирішуються;

3. Другий етап аналізу стану об'єкту дозволяє за допомогою логічного виводу на основі відомих факторів отримати множину рішень  $D_{ff}^{(2)}$  з визначеними коефіцієнтами впевненості  $KU_{ff}$ , уточнити результат першого етапу аналізу стану об'єкта  $D_{ij}^{(1)}$ , а також провести наступне уточнення їх стану на множині рішень  $D_{lj}^{(3)}$ ,  $D_{sj}^{(4)}$  або видає висновок про відсутність будь-якого рішення з класу задач  $\tilde{D}_{закл}$ , який вирішуються;

4. Третій етап аналізу стану об'єкту дозволяє за допомогою логічного виведення на основі додаткових досліджень отримати множину рішень  $D_{lj}^{(3)}$  з визначеними коефіцієнтами впевненості  $KU_{lj}$ .

Він уточнює результати першого та другого етапів аналізу станів об'єкта  $D_{ij}^{(1)}$  та  $D_{ff}^{(2)}$ , а також проводить наступні уточнення їх станів на множині рішень  $D_{sj}^{(4)}$  або видає висновок про відсутність будь-якого рішення з класу задач  $\tilde{D}_{закл}$ , який вирішуються;

5. Четвертий етап аналізу стану об'єкта дозволяє за допомогою логічного виводу на основі додаткових даних отримати множину рішень  $D_{sj}^{(4)}$  з визначеними коефіцієнтами впевненості  $KU_{sj}$ .

Він уточнює результат першого, другого та третього етапів аналізу стану об'єкта  $D_{ij}^{(1)}$ ,  $D_{ff}^{(2)}$  та  $D_{lj}^{(3)}$ , а також за допомогою всіх попередніх уточнень стану об'єкта видає заключне рішення  $D_{закл}^{(4)}$  з максимальним коефіцієнтом впевненості  $KU_{sj} \rightarrow \max$  або видає висновок про відсутність будь-якого рішення з класу задач  $\tilde{D}_{закл}$ , який вирішуються;

6. Обробка і аналіз отриманої інформації після першого та другого етапів аналізу стану об'єкта дослідження дозволяють відібрати найбільш значущі результати та в подальшому робити тільки з ними;

7. Обробка та аналіз отриманої інформації після третього етапу аналізу стану об'єкта дослідження з урахуванням першого та другого етапів аналізу стану об'єкта дозволяють відібрати найбільш значущі результати та в подальшому робити тільки з ними;

8. Обробка і аналіз отриманих результатів після четвертого етапу аналізу стану об'єкта дослідження з урахуванням результатів третього етапу аналізу стану об'єкта дозволяють відібрати результат з найбільшим коефіцієнтом впевненості;

9. Результат після першого та другого етапів аналізу стану об'єкта дослідження видає множину рішень з визначеними коефіцієнтами впевненості, а також рекомендації, які відповідають даним рішенням або рекомендації до збору необхідної інформації для отримання більш чіткого рішення;

10. Результат після третього етапу аналізу стану об'єкта дослідження видає множину рішень з визначеними коефіцієнтами впевненості, а також рекомендацій, які відповідають даним рішенням або рекомендації до збору необхідної інформації для отримання більш чіткого рішення;

11. Результат після четвертого етапу аналізу стану об'єкта дослідження видає одне рішення з максимальним коефіцієнтом впевненості;

12. Заключне рішення з визначеним коефіцієнтом впевненості.

Деякі рішення на відношеннях  $R_{2,3}$ ,  $R_{2,12}$ ,  $R_{9,12}$ ,  $R_{10,5}$ ,  $R_{10,8}$ ,  $R_{10,12}$ ,  $R_{11,12}$  можуть бути уточнені особою, яка приймає рішення (ОПР). Це зазвичай визначається відповідальністю рішень та дозволяє знизити вимоги до рівня кваліфікації персоналу, водночас підвищуючи достовірність рішень.

Структурну схему побудови та взаємодії основних модулів системи представлено в [86]. Вона складається з:

- підсистеми отримання знань про стан об'єкту;
- підсистеми обробки та формалізації вихідних даних і знань (ПОФИДЗ);
- підсистеми логічного виводу;
- підсистеми реєстрації та обробки даних;
- підсистеми формування рішень і рекомендацій (ПФРР);
- блоку моделювання і настройки  $\mu(x)$  (МІН);
- інтерфейсу з ОПР.

#### **4.2. Бінарні методи настроювання функцій належності в нечітких системах**

В нечіткій логіці значення деякої величини представляють не числами, а лінгвістичними термами [89]. Для лінгвістичної змінної «дистанція» термами є «далеко» і «близько». При реалізації лінгвістичної змінної необхідно дати точний фізичний опис її термів. Слід відзначити, що визначення ступеню належності можливо тільки при сумісній роботі з експертами. Виникає питання про необхідну кількість термів в для змінної при достатньо точному представленні фізичної величини. Існує думка, що для більшості додатків достатньо 3-7 термів на кожен змінну.

Належність кожного точного значення до одного з термів лінгвістичної змінної визначають функцією належності [89]. На рис. 4.5 зображено стандартні функції належності, які легко застосувати до розв'язання більшості задач. При вирішенні специфічних задач можна вибрати інші, більш зручні види функцій належності, і як показує практика, досягти кращих результатів роботи системи, ніж при використанні функцій стандартного виду.

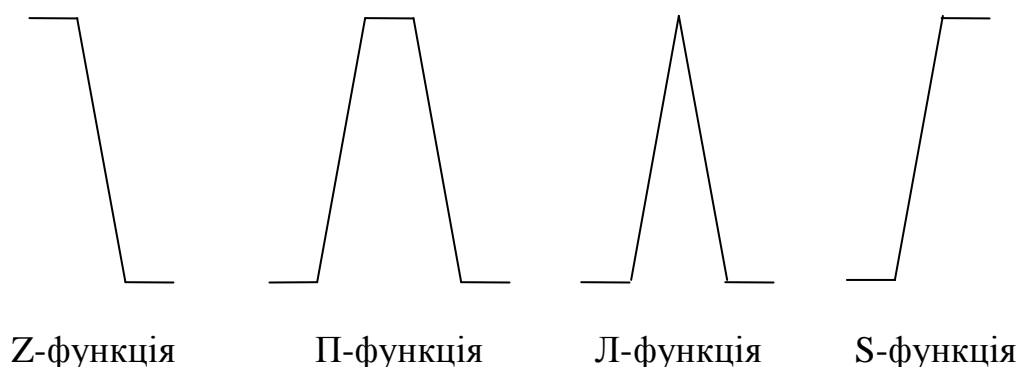


Рис. 4.5 – Типи функцій належності

В процесі побудови функції належності виникає необхідність визначення її параметрів і приведення у відповідність до існуючих експертних оцінок функцій.

*Градiєнтні методи.* Будь-яку сукупність речових чисел  $(v_1, v_2, \dots, v_k)$ , взятих у визначеному порядку, можна розглядати як точку або вектор з тими ж координатами в просторі  $k$  вимірів ( $k$  - вимірному просторі). Запис виду  $v = (v_1, v_2, \dots, v_k)$  означає точку або вектор  $v$  з вказаними у дужках координатами [90]. Якщо для  $k$  - вимірних векторів  $v$  і  $w$  вірні основні алгебраїчні операції:

складання та віднімання

$$v \pm w = (v_1 \pm w_1, v_2 \pm w_2, \dots, v_k \pm w_k),$$

множення на дійсне число  $u$

$$u \times v = (u \times v_1, u \times v_2, \dots, u \times v_k),$$

скалярний добуток

$$v \times w = (v_1 \times w_1, v_2 \times w_2, \dots, v_k \times w_k),$$

то сукупність таких векторів позначають  $E_k$  і називають  $k$ -вимірним евклідовим простором.

Довжиною вектора  $v$  називають число, яке визначене за формулою

$$|v| = \sqrt{vv} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_k^2}. \quad (4.8)$$

Довжину вектора (4.8) можна вирахувати тільки тоді, коли компоненти вектора представлені в одній шкалі вимірів або вони є безрозмірними величинами.

Якщо добуток  $v \times w = 0$  при  $|v| \neq 0$  і  $|w| \neq 0$ , то вектори  $v$  і  $w$  є ортогональними.

Одиничний вектор визначають за формулою:

$$t = (t_1, t_2, \dots, t_k) = \left( \frac{v_1}{|v|}, \frac{v_2}{|v|}, \dots, \frac{v_k}{|v|} \right). \quad (4.9)$$

Нехай у  $E_k$  задані деяка точка  $v = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ , одиничний вектор  $t$  і функція  $f(V) = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ , що безперервно диференціюється по всіх аргументах.

Похідною в точці  $V$  від функції  $f(V)$  по напрямку променю, визначеному вектором  $t$ , називають межу:

$$\frac{\partial f(V)}{\partial t} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{f(v_1 + \lambda t_1, \dots, v_k + \lambda t_k) - f(v_1, \dots, v_k)}{\lambda}$$

або

$$\frac{\partial f(V)}{\partial t} = \left[ \frac{\partial f(V)}{\partial v_1} t_1, \frac{\partial f(V)}{\partial v_2} t_2, \dots, \frac{\partial f(V)}{\partial v_k} t_k \right]. \quad (4.10)$$

Градiєнтом функції  $f(V)$  називають вектор  $\Delta f(V)$  з координатами, що дорівнюють частковим похідним по відповідних аргументах:

$$\nabla f(V) = \left( \frac{\partial f(V)}{\partial v_1}, \frac{\partial f(V)}{\partial v_2}, \dots, \frac{\partial f(V)}{\partial v_k} \right). \quad (4.11)$$

Градiєнт вказує напрям найбільшого зростання функції. Протилежний напрям  $-\Delta f(V)$  називають антиградiєнтом, він показує напрям найшвидшого зменшення функції. В точці екстремуму  $V^*$  градiєнт дорівнює нулю  $\Delta f(V^*) = 0$ . Якщо аналітично похідні визначити неможливо, то їх вираховують наближено з використанням кінцево-різницевого підходу:

$$\frac{\nabla f(V)}{\nabla v_i} = \frac{\Delta f(V)}{\Delta v_i}, \quad (4.12)$$

де  $\Delta f(V)$  - приріст функції  $f(V)$  при зміні аргументу на величину  $\Delta v_i$ . Рухаючись по градiєнту (антиградiєнту) можна досягти максимуму (мінімуму) функції. В цьому і складається сутність градiєнтного методу оптимізації.

Одна з основних проблем застосування градієнтного методу пошуку (4.8 – 4.12) полягає у виборі величини кожного дискретного кроку. кроки можуть бути постійними і змінними. Другий варіант в реалізації алгоритму більш складний, але звичайно потребує меншої кількості ітерацій.

Розглянутий алгоритм застосовують тільки для нелінійних функцій.

Недоліком цих алгоритмів є також їх обчислювальна ресурсомісткість і ускладненість пошуку глобального екстремуму при наявності функції з множиною локальних екстремумів.

*Генетичні алгоритми.* Це евристичний алгоритм пошуку, який використовується для рішення задач оптимізації і моделювання. Він здійснюється шляхом послідовного підбору, комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів, які нагадують біологічну еволюцію та є різновидом еволюційних обчислень. Відмінною особливістю генетичних алгоритмів є акцент на використання оператора «схрещування», який виробляє операцію рекомбінації рішень-кандидатів, роль якої аналогічна ролі схрещування в живій природі [91].

При генетичному алгоритмі задача кодується таким чином, щоб її рішення могло бути представлене у вигляді вектору («хромосоми»). Випадковим чином створюється деяка кількість початкових векторів («початкова популяція»). Вони оцінюються з використанням «функції пристосування» і кожному вектору присвоюється визначене значення («пристосованість»), яке визначає імовірність виживання організму, представленого даним вектором. Використовуючи отримані значення пристосованості, вибираються вектори (селекція) допущені до «схрещування». До цих векторів застосовують «генетичні оператори», створюючи таким чином наступне «покоління». Особі наступного покоління також оцінюються, потім виконується селекція, застосовуються генетичні оператори і т. д. Так моделюють «еволюційний процес» з декількома життєвими циклами (поколіннями), доки не буде виконано критерій останову алгоритму.

Таким критерієм може бути:

- знаходження глобального або субоптимального рішення;
- вичерпаність числа поколінь, заданих на еволюцію;
- вичерпаність часу, допустимого на еволюцію.

Генетичні алгоритми виконують пошук рішень в дуже великих, складних просторах станів. Виділимо такі етапи генетичного алгоритму:

1. Створення початкової популяції.
2. Визначення (задання) функцій пристосування для осіб популяції (оцінювання).
3. Вибір індивідів з поточної популяції (селекція).
4. Схрещування і (або) мутація.
5. Вирахування функцій пристосованості для всіх осіб.
6. Формування нового покоління.
7. Кінець циклу.

Якщо виконуються умови останову, то кінець циклу, інакше переходимо до кроку 3.

Слід відзначити, що генетичні алгоритми дозволяють з достатньо високою точністю апроксимувати функцію, але вони володіють і рядом істотних недоліків, до яких відносять:

- високу обчислювальну складність (що нераціонально при машинній обробці);
- складність в реалізації самого алгоритму.

**Постановка задачі досліджень.** Функції належності на рис. 4.5 представлені у вигляді трикутника. В загальному випадку всі функції належності можна розділити на три значення: функції «великої», «малої» та «середньої» величини.

Припустимо, що задана деяка функція належності. Експерт задає її вид  $\mu(x)$  з деякими параметрами  $k$ . В процесі нечіткого логічного виведення Заде-



Мамдані [91] встановлено, що вихідна функція (функції) належності мають похибку  $\Delta$ , яка перевищує деяку допустиму похибку  $\varepsilon$ .

Необхідно:

- на множині функцій  $\mu(x)$  запропонувати метод, який мінімізує похибку  $\Delta$  з урахуванням допустимої похибки  $\varepsilon \leq \varepsilon^*$ , де  $\varepsilon^*$  - гранично допустиме значення похибки;
- визначити і обґрунтувати складність рішення поставленої задачі за критерієм часу  $\tau$ .

**Розробка розширеного методу дихотомії для задачі настройки параметрів функції належності.** Для вирішення поставленої задачі було запропоновано використання бінарного підходу[91], або методу дихотомії для підбору параметрів нечітких функцій належності.

Дихотомія (метод половинного поділу) – послідовний поділ на дві частини, не пов'язані між собою. Дихотомічний поділ в математиці, філософії, логіці і лінгвістиці є методом утворення взаємовиключаючих підрозділів одного поняття або терміну, а також необхідний для створення класифікації елементів [92].

Однією з переваг дихотомічного поділу є простота його реалізації. Достатньо двох класів, які вичерпують обсяг поняття, що ділиться. Таким чином, дихотомічний поділ завжди визначений; члени поділу виключають один одного, тому що кожний об'єкт множини, що ділиться, попадає тільки в один з класів  $a$  або не  $\bar{a}$ ; поділ проводиться по одному визначенні – наявність або відсутність деякої відзнаки. Позначивши ділиме поняття буквою  $a$  і виділивши в його об'ємі деякий вид  $b$ , можна розділити об'єм  $a$  на дві частини  $b$  і не  $b$ .

Метод дихотомії в деякій мірі збігається з методом бінарного пошуку, але відрізняється від нього критерієм відбракування кінців [92].

Нехай задана функція

$$f(x):[a,b] \rightarrow R, f(x) \in C([a,b]).$$

Розіб'ємо у думці заданий відрізок пополам і візьмемо дві симетричні відносно центру точки  $x_1$  і  $x_2$  так, що:

$$x_1 = \frac{a+b}{2} - \delta; \quad x_2 = \frac{a+b}{2} + \delta, \quad (4.13)$$

де  $\delta$  - деяке число в інтервалі  $\left(0, \frac{b-a}{2}\right)$ .

Відкинемо той з кінців початкового інтервалу, до якого ближче виявилась одна з двох знов поставлених точок з максимальним значенням (у випадку пошуку мінімуму): якщо  $f(x_1) > f(x_2)$ , то береться відрізок  $[x_1, b]$ , а відрізок  $[a, x_1]$  відкидають. Інакше береться дзеркальний відносно середини відрізок  $[a, x_2]$ , а відкидають  $[x_2, b]$ .

Процедура повторюється до тих пір, поки не буде досягнута задана точність, наприклад, поки довжина відрізка не досягне половини значення заданої похибки.

Так як на кожній ітерації приходить вираховувати нові точки, необхідно запропонувати метод, який дозволить обчислювати лише одну нову точку на черговій ітерації, що суттєво оптимізує процедуру. Такий підхід досягається шляхом дзеркального поділу відрізка, в даному випадку метод поділу можна розглядати як розширення методу дихотомії з параметром

$$\delta = (b-a) \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{\phi} \right). \quad (4.14)$$

Слід відзначити також, що дихотомія володіє властивістю збігу для безперервних функцій, в тому числі і недиференційованих [93].

До підбору параметрів нечіткої функції належності метод дихотомії застосовують наступним чином: при дефазифікації виділяють деякі значення нечітких функцій належності, які входять в вираз «Якщо «X», то «Y»».

Аргументом вхідної функції належності подається деяка величина  $x_{\text{вх}}$ , яка у відповідності до одного з методів дефаззифікації (наприклад, центроїдним), проєкується на вихідну функцію  $Y$ . В якості виходу отримуємо деяке значення  $y_{(\text{факт})}$ .

Суть підбору параметрів полягає в тому, щоб змінити вид функції належності на виході у відповідності з отриманим від експерта очікуваним значенням  $y_{(\text{очік})}$ . В даному випадку має місце процес апроксимації вихідної функції належності з виконанням умови:

$$|y_{(\text{факт})} - y_{(\text{очік})}| \leq \varepsilon, \quad (4.15)$$

де  $\varepsilon$  - числове значення апроксимації, тобто гранично допустиме відхилення фактичного значення від очікуваного.

Так як функція належності любого типу володіє деякою параметричною величиною  $k$ , то саме вона підлягає підбору значення. наприклад, для функції «великої» величини має місце вираз:  $y = 1 - e^{k(x-a)^2}$ .

Параметр  $k$  підлягає дихотомії з використанням кроку апроксимації, який дорівнює  $\frac{\varepsilon}{2}$ . Дану величину кроку обумовлено необхідністю виконання виразу (4.15). На виході метод надає вишукані значення параметрів функції належності.

Дослідження обчислювальної складності методу показали, що кількість ітерацій методу, а відповідно і час його роботи  $\tau$  мають експоненціальну залежність від величини значення точності  $\varepsilon$ . Складність представимо як  $O(n) \approx e^n$ , де  $O(n)$  – складність методу;  $n$  - кількість ітерацій.

Для графічної оцінки обчислювальної складності було проведено нормування значень точності і кількості операцій до одиничної норми, тобто якщо позначити точність  $\varepsilon'$ , то вона приймає значення  $\varepsilon' = 1 - \varepsilon$ . Кількість

операцій вираховується помноженням реального числа виконуваних операторів на коефіцієнт пропорційності  $a$ , де  $a = \frac{1}{N}$ ,  $N$  - кількість операцій при  $\varepsilon' \geq 1$ .

Було виконано вимірювання часу роботи програми на апаратній платформі комп'ютеру з процесором Intel Core2Duo, тактовою частотою 2 ГГц, об'ємом ОЗУ 2 Гб і операційною системою Windows XP Professional. При значенні точності  $\varepsilon=0,01$ , час обчислювальної роботи додатку склав  $\tau=12$  мс; при значенні точності  $\varepsilon=0,001$ , час обчислювальної роботи склав  $\tau=786$  мс.

**Програмна реалізація розробленого методу.** Даний додаток призначений для реалізації автоматичного настроювання параметрів функції належності  $k$  по деяким вхідним умовам. Користувач має можливість визначати наступні умови: типи вхідної та вихідної фаззи-величин («мала», «середня», «велика»); значення аргументу для вхідної величини  $x_{ex}$  (точка відліку дефазифікації); очікуване значення аргументу вихідної величини  $y_{(очік)}$  на основі деяких отриманих раніше експертних оцінок; необхідна точність обчислень  $\varepsilon$ .

Суть обчислень, що проводяться, полягає в підборі значення коефіцієнта  $k$ , що визначає вид функції вихідної нечіткої величини заданого типу з метою знаходження наближення значення  $y_{(факт)}$  до значення  $y_{(очік)}$  з дотриманням вимог точності обчислень.

Додаток реалізує алгоритм настроювання параметрів при дефазифікації нечітких величин :

- визначення типів вхідної і вихідної нечітких величин;
- вказівка точки відліку у вигляді аргументу функції вхідної нечіткої величини  $x_{ex}$ ;
- знаходження значення функції вхідної нечіткої величини, відповідного заданій точці відліку і зіставлення значенню вихідної нечіткої величини;

- формування складеної підінтегральної фігури обмеженої функцією вихідної нечіткої величини і лінією проєцирування значення функції вхідної нечіткої величини на графік функції вихідної нечіткої величини;

- знаходження абсциси центру тяжіння отриманої фігури, яка визначає  $y_{(факт)}$ .

Алгоритм підбору значення коефіцієнта  $k$  для вихідної нечіткої величини зводиться до мінімізації (з раніше визначеною точністю  $\varepsilon$ ) абсолютної різниці очікуваного і фактичного значення аргументу:  $\Delta x = |y_{(факт)} - y_{(очік)}|$ .

Програмна реалізація даного алгоритму припускає наявність деяких апроксимуючих допущень, що дозволяють реалізувати обчислення чисельними методами [94] за допомогою розбиття аналізованої підінтегральної фігури на ряд простих складових (прямокутні трапеції) з метою знаходження центру тяжіння. Кількість розбиваних фігур визначається заданою точністю обчислень. До апроксимації можна віднести і механізм підбору коефіцієнта вихідної функції, який здійснюється методом дихотомії (половинного поділу) (4.13 – 4.14).

Класова ієрархія програмної реалізації складається з трьох базових класів (рис. 4.6) [94]: класу головної інтерфейсної форми TMainForm; класу нечіткої величини (опис функції належності) FuzzyValue; класу довільного багатокутника MyPoly, використовуваного при знаходженні центру тяжіння в процесі дефаззифікації. Між усіма класами програми встановлено відношення агрегації. Основна обчислювальна складова визначена у функціях-членах класів.

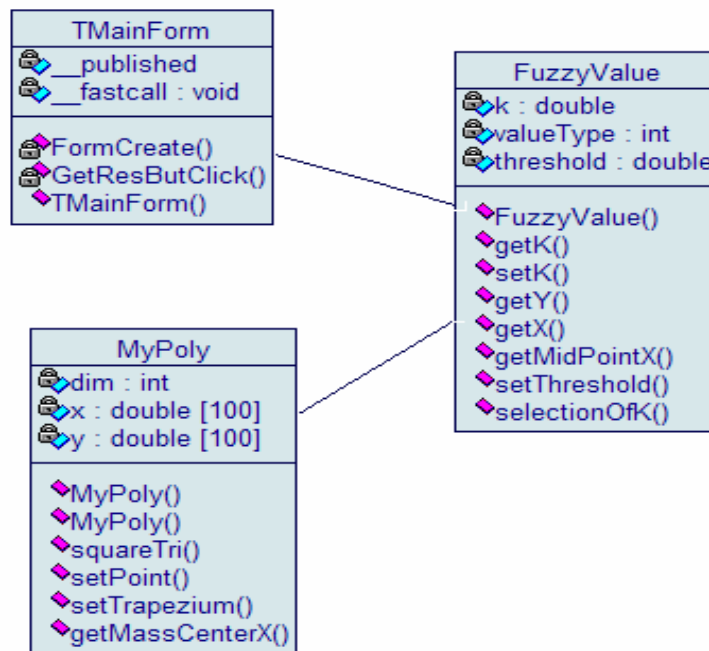


Рис. 4.6 – Діаграма класів програми

Основними функціями для реалізації запропонованого методу є функція знаходження центру тяжіння `getMidPointX()` і функція дихотомічного підбору параметра  $k$  `selectionOfK()`.

Інтерфейсна частина програми гранично проста і орієнтована на користувача. Вона надає можливість завдання для вхідних параметрів: тип нечіткої функції, її параметр  $k$  і вхідне значення аргументу; для вихідних параметрів: тип нечіткої функції, очікуване вихідне значення  $y_{(очік)}$ , точність обчислень  $\varepsilon$ . Існує можливість обчислення параметрів складності та часу роботи системи залежно від вибраної точності. Надається функція збереження результатів роботи програми і деякі інші сервісні функції.

### 4.3 Розвиток методів настроювання функцій належності з використанням нечіткої інтервальної багатозначної логіки

В процесі роботи з нечіткими функціями належності, які є результатом фаззифікації лінгвістичних підставної і їх значень деякими правилами продукції

if/then [89], виникає необхідність диференціювання функцій приналежності. Це, зокрема, відноситься до процесів оптимізаційного настроювання параметрів функції приналежності.

За звичай функція приналежності у вигляді трикутника задається наступною аналітичною формулою (4.1).

У випадку використання таких функцій виникають проблеми їх диференціювання в області пошуку екстремумів. Крім того, застосування методу дихотомії не завжди дозволяє мінімізувати обчислювальні ресурси.

Вирішити цю проблему в значній мірі дозволяє використання в якості функцій належності гауссіанів і підходів на основі багатозначної нечіткої логіки [95]. Значення деяких лінгвістичних змінних в області термів «мале», «велике», «середнє» може бути представлене аналітичними формами [72, 91, 96]:

$$\mu(x) = e^{-k_1 x^2}, k_1 \geq 0, \quad (4.16)$$

$$\mu(x) = 1 - e^{-k_2 x^2}, k_2 \geq 0, \quad (4.17)$$

$$\mu(x) = e^{-k_3 (x-a)^2}, k_3 \geq 0, \quad (4.18)$$

Відомо, що такі функції є диференційованими на всій області визначення, що дозволяє уникнути вказаних вище недоліків. З цієї причини доцільно використовувати їх в якості базисних при розробці методів і алгоритмів підбору параметрів за заданими критеріями.

В якості оптимізаційних алгоритмів при вирішенні задачі пошуку екстремумів функцій належності часто використовують градієнтні методи, а також еволюційні алгоритми. Як відомо, недоліком цих алгоритмів є обчислювальна ресурсомісткість, а також труднощі пошуку глобального екстремуму при наявності функцій з множиною локальних екстремумів.

Під багатозначною логікою [97] будемо розуміти тип формальної логіки, характерний наявністю більше ніж двох можливих істинностних значень істинності (false, true). Першу систему багатозначної логіки запропонував

польський математик Ян Лукасевич в 20 столітті. На цей час існує дуже багато інших систем багатозначної логіки, які в свою чергу можуть бути згруповані по класам. Важливішими з таких класів є часткові логіки та нечіткі логіки.

Ці моделі відображають дві основні риси останньої – множинність значень істинності висловлювань і можливість побудови нових, більш складних висловлювань із заданих за допомогою логічних операцій, які дозволяють також по значення істинності вихідних висловлювань встановлювати значення істинності складного висловлювання. Прикладами багатозначних висловлювань є судження з модальним виходом («так», «ні», «може бути») і судження імовірнісного характеру, а прикладами логічних операцій – логічної зв'язки типу «і», «або», «якщо ..., то ...». В загальному випадку моделі багатозначної логіки являють собою узагальнення алгебри логіки. Важливо відзначити, що в алгебрі логіки висловлювання приймають тільки два значення істинності («так», «ні»), в зв'язку з чим вона в загальному випадку не може відобразити всього різномайття логічних побудов, що зустрічаються на практиці.

Побудова моделей багатозначної логіки здійснюється по аналогії з побудовою двозначної логіки. Так, індивідуальні висловлювання логіки, розбиті на класи з одним і тим же значенням істинності, приводять до поняття множини  $E$ -констант моделі, які фактично ототожнюють всі індивідуальні висловлювання, замінюючи їх відповідними значеннями істинності; підставні висловлювання – до підставних величин  $x_1, x_2, \dots$ , які в якості значень приймають елементи з множини  $E$ ; логічної зв'язки – до множини  $M$  елементарних функцій (операцій), що, як і їх аргументи, приймають значення з  $E$ . Складні висловлювання, побудовані з індивідуальних і змінних висловлюваннях, а також логічних зв'язках, приводять до множини  $\langle M \rangle$  формул над  $M$ . Значення істинності з  $E$  складного висловлювання є функцією від відповідних значень істинності висловлювань, які входять до даного складного висловлювання. В моделі ця функція приписується формулі, що відповідає даному складному висловлюванню; кажуть також, що формула реалізує цю функцію. Множина



формул  $\langle M \rangle$  приводить до множини  $[M]$  функцій, що реалізуються формулами з  $\langle M \rangle$  і називаються суперпозиціями над  $M$ . Множину  $[M]$  називають замиканням множини  $M$ . Завдання конкретної моделі багатозначної логіки рахується еквівалентним вказівкою множин  $E$ ,  $M$ ,  $\langle M \rangle$  і  $[M]$ ; при цьому кажуть, що модель породжується множиною  $M$ . Цю модель називають формульною моделлю, а також  $m$ -значною логікою, де  $m$  позначають потужність множини  $E$ .

**Постановка задачі.** В роботі [91] запропоновано підхід, орієнтований на використання методу дихотомії (половинного поділу) [92] з метою досягнення деякої заданої точності  $\varepsilon$  при дослідженні параметра  $k$  функцій приналежності (4.16 - 4.18) для досягнення апріорно відомої експертної оцінки дефазіфікованого значення нечіткої величини. Не дивлячись на те, що метод і, відповідно, алгоритм є збіжним [98], часові показники його швидкодії можуть бути покращеними посередством введення можливості оптимізації параметра самого алгоритму шляхом застосування принципів нечіткої логіки і ранжирування.

Тоді критерієм зупину ітеративної роботи алгоритму є вираз [95]:

$$|y_{(факт)} - y_{(очік)}| \leq \varepsilon, \quad (4.19)$$

де  $y_{(факт)}$  - фактично дефазіфікане значення нечіткої величини, а  $y_{(очік)}$  - експертна оцінка очікуваного дефазіфікованого значення.

В раніше запропонованому методі [91] настроювання параметра  $k$  виконувалась безпосередньо додаванням до поточного його значення

$$\Delta y / 2 = (y_{(факт)} - y_{(очік)}) / 2$$

з послідуєчим вирахуванням аналітичних форм (4.16 – 4.18). Таким чином, оцінка часу роботи алгоритму  $\tau$ , що виражається в кількості операцій

алгоритму, мала константну зворотно-пропорційну залежність від обраної точності апроксимації.

В даній роботі необхідно:

- запропонувати підходи до підвищення швидкості обробки даних шляхом модифікації існуючих методів і підходів;
- забезпечити збіжність алгоритму посередством настроювання кроку дихотомії та забезпечити знаходження оптимальних параметрів кроку для кожного виду нечітких функцій шляхом ранжирування параметрів на множині критеріїв:

$$\tau_p \xrightarrow{F} \min, \quad (4.20)$$

де  $\tau_p$  - час рішення задачі,

F - множина обмежень предметної області.

**Розробка методу.** Процедури нечіткого логічного виводу в знання орієнтованих моделях передбачають рішення наступної задачі.

Нехай задано деяку підмножину правил продукції вигляду [89]:

$$if\ x\ is\ \mu_i(x)\ then\ y\ is\ \mu_j(y). \quad (4.21)$$

При деякому заданому значенні  $x'$  рішення правила (4.21) може бути представлено у вигляді [72]:

$$\begin{array}{l} if\ x\ is\ \mu_i(x)\ then\ y\ is\ \mu_j(y) \\ x = x' \\ \hline y' - ? \end{array} \quad (4.22)$$

і рішення (4.22) може бути реалізоване у вигляді рішення на основі оператора Заде-Мамдані:

$$\mu'(y) = \vee \mu'(x) \wedge \mu(x, y) \quad (4.23)$$

з наступною дефазифікацією [72] наприклад, у вигляді знаходження чіткого значення  $y_0$  по правилу, наприклад, центру мас [72]:

$$y_0 = \frac{\sum y_{0i} S_i}{\sum S_i}, \quad (4.24)$$

де  $y_{0i}$  - центр мас деякої предметної області,

$S_i$  - площа деякої елементарної області.

Згідно методу дихотомії [91],

$$y_{(факт)} \neq y_{(очік)} \quad (4.25)$$

і необхідне підстроювання параметрів функції належності (4.16 – 4.18), що потребує додаткових досліджень.

В якості рішення поставленої задачі (4.20 – 4.25) було запропоновано варіант використання деякого інтервалу значень для вибору знаменника дихотомії. Таким чином, введено два параметри алгоритму:

$d2$  - верхня межа інтервалу вибору множника (нижня межа завжди дорівнює 0 і є відкритим кінцем інтервалу),

$\Delta d$  - крок дискретизації інтервалу.

Тоді дискретний набір значень може бути представлено у вигляді:

$$D = \{\Delta d, 2 \cdot \Delta d, 3 \cdot \Delta d, \dots, d2\}.$$

Поточне значення множника -  $m(m \in D)$ . Таким чином, при підборі основного параметра нечіткої функції  $k$ , він буде змінюватись на значення  $\Delta y/m$ .

Тоді, якщо визначено функцію знаходження операційної потужності алгоритму [93] від заданого значення  $m$ :

$$f(m), \quad (4.26)$$

то справедливий для (4.25) маємо вираз:

$$f(\Delta d) \neq f(2 \cdot \Delta d) \neq f(3 \cdot \Delta d) \neq \dots \neq f(d2) \quad (4.27)$$

Дане положення (4.27) передбачає проведення для кожного з  $n$  типів нечітких функцій процесу дихотомічної апроксимації параметра і вибору такого значення  $m_i$ , при якому кількість операцій є мінімальною

$$f(m_i) = \min(f(m)). \quad (4.28)$$

Це дозволить (4.28) при однократному здійсненні процесу оптимізації коефіцієнту дихотомії вибрати оптимальний його варіант за критерієм часу і надалі використовувати саме обране значення  $m_i$  в рамках досліджуваної задачі.

Етапами метода рішення представленої задачі можуть бути:

- Фаззифікація правила-продукції, вибір типів функції належності.
- Використовуючи експертні оцінки, формулювання параметрів функції належності.
- Рішення задачі нечіткого логічного виведення.
- Дефаззифікація нечіткого логічного виведення.
- Визначення оцінки очікуваного дефаззифікованого значення  $y_{(очік)}$ .
- Завдання параметрів  $d2, \Delta d, \varepsilon$ .
- Запуск процесу ітераційної апроксимації.
- Зупинення процесу при досягненні необхідної точності  $\varepsilon$ .

- Визначення оптимальних значень множника дихотомії  $m$  для різних типів функцій належності.
- Видача рекомендацій по оптимальному значенню множника для конкретного типу нечіткої величини функції належності з використанням критерію ранжирування.
- Повторний прогін, уточнення параметрів дихотомії.
- Уточнення параметра  $k$ .
- Останов.

Така модифікація не тягне за собою зміни колишніх властивостей алгоритму [91], за виключенням введення двох параметрів (верхня межа інтервалу дискретизації знаменника дихотомії  $d2$ , крок дискретизації  $\Delta d$ ), але дозволяє прискорити збіжність при необхідності багаторазового підбору параметру  $k$  в рамках деякої предметної області правил.

**Структура програмних засобів рішення поставленої задачі.**  
 Програмною реалізацією підходу є модифікація раніше запропонованого методу і програмного продукту [91]. UML-діаграму класів запропоновано на рис. 4.7.

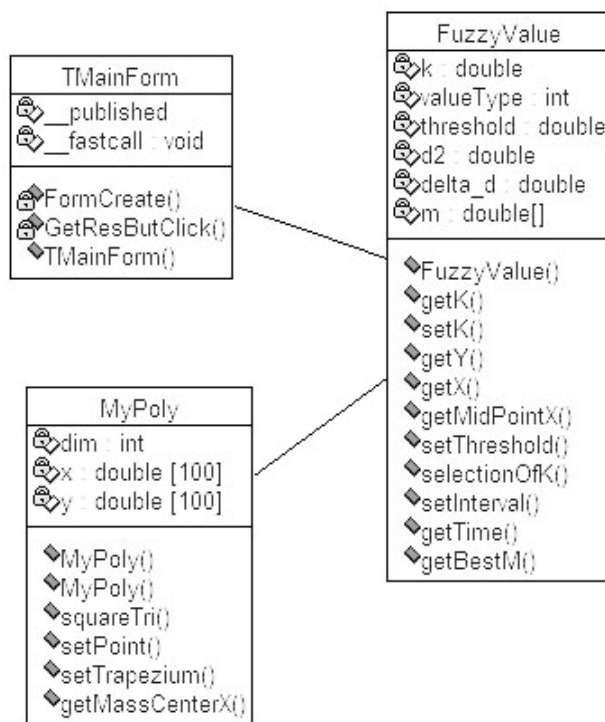


Рис. 4.7 – UML-діаграма класів

В даній структурі класів програмного середовища C++ [94] було додатково введено зміни класу FuzzyValue: добавлено метод unsigned int getTime(), який реалізує визначення часу роботи алгоритму для поточного значення знаменника дихотомії; метод setInterval(double d2, double delta\_d) – реалізує установку відповідних полів класу, задання інтервалу дискретних значень масиву double[] m; метод double getBestM() – вертає таке значення  $m$ , при якому час виконання алгоритму мінімальний.

Також добавлено відповідні поля члени класу для зберігання меж інтервалу, кроку дискретизації та масиву дійсних значень множника дихотомії  $m$ .

**Практична реалізація.** В результаті проведених модифікацій програмний продукт дозволяє користувачеві ввести додаткові параметри алгоритму:  $d2$ ,  $\Delta d$ , що розширює його функціональні можливості. Після вибору термів нечіткої величини [51], завдання початкового значення  $k$ , а також експертної оцінки дефазифіцированого значення  $y_{(очік)}$ , виконується апроксимація функції для досягнення необхідної точності. В результаті обчислень виводяться значення функції  $f(m)$  для всіх значень  $m$  із інтервалу  $(0;d2]$ . Також користувачеві видається оперативна інформація про вибір оптимального значення  $m$ , в даній задачі для досягнення максимальної швидкодії роботи алгоритму і можливості встановлення цього значення як значення для послідуочної роботи. Використання запропонованих підходів в просторово розподілених об'єктах кадастрової оцінки земельних ділянок підтверджує ефективність застосованих рішень.

#### **4.4 Інформаційні технології оцінювання станів територій в ГІС за умов невизначеності**

Важливим аспектом прийняття попередніх оперативних оцінок про стан просторово розподілених об'єктів землекористування є невизначеність та відсутність вихідних даних про стан об'єкта. На стан об'єкта впливає множина

факторів, оцінка і аналіз яких є складною проблемою внаслідок відсутності апіорних даних. До них, в першу чергу, слід віднести багатоаспектність, різноплановість та багатокритеріальність множини існуючих факторів, що функціонують в умовах невизначеності нечіткого простору станів. На цей час, як інструмента в прийнятті відповідальних рішень в умовах невизначеності, актуальним є використання алгебри нечітких вираховань[72, 98]. Задача становиться надзвичайно важливою внаслідок відсутності ефективного математичного апарату, спрямованого на оперативне вирішення поставлених проблем, що визиває додатковий інтерес до їх вирішення [95].

Приймемо за мету розробку підходів до знаходження цілеспрямованих оперативних рішень, що дозволяють оцінити стан множини факторів, виділити з них найбільш важливі в кількісному і можливо якісному аспекті для прийняття рішень. Такий підхід дозволить підвищити вірогідність рішень при одночасному зниженні часу аналізу простору станів об'єкта.

**Постановка задачі дослідження.** Нехай існує функціонально і територіально розподілений об'єкт. Об'єкт включає множину земельних ділянок промислового або іншого призначення. При оцінці їх вартості, привабливості, функціональній придатності існує множина факторів  $\{\Phi_i\}$ ,  $i \in I$ , до яких у першу чергу слід віднести: протяжність ліній газотранспортних магістралей -  $L_i$ , віднесених до корисної площі охопту площ забудови  $S_i$ ; протяжність ліній каналізаційних стоків  $L_j$ , віднесених до корисної площі охопту площ забудови  $S_j$ ; привабливість територій  $C_{ij}$ ; супутні фактори  $\Phi_k$ , що інтегрують деяку підмножину корисних факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$ . Множина процесів  $\tilde{\Phi}_i$  функціонує в нечіткому просторі станів, що вимагає ефективних засобів та методів [99] настроювання параметрів функції належності [91, 95].

Необхідно:

- запропонувати підходи до оцінки привабливості таких процесів  $\tilde{\Pi}_{ij}^{(s)}$ ;
- оцінити способи прийняття рішень на множині альтернатив  $At_m$ ;

- сформулювати рекомендації по вибору і оцінці альтернатив  $At_m$ ;
- процеси оцінки на множині факторів  $\Phi_k \in \Phi_i$  повинні бути орієнтовані на сучасні інформаційні технології і рішення.

**Розробка методів оцінювання на множині існуючих факторів.** Нехай існує деяка підмножина факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$ . Для цих факторів характерний нечіткий простір станів  $\tilde{R}$ , причому простір  $\tilde{R}$  представлений на множині відношень «умова-дія». Тоді для множини  $\tilde{\Pi}_{ij}^{(s)}$  можна сформулювати таке:

**Твердження 4.1.** Якщо існують функції належності [72] на деякій області їх визначень  $[0, X_0]$  на множині факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$ , то ефективним є фактор, для якого відстань Хеммінга [3] при їх попарному порівнянні приймає значення:

$$d(\mu_{\tilde{\Phi}_k}(x), \mu_{\tilde{\Phi}_l}(x)) \rightarrow \min, \quad (4.29)$$

де  $d(\bullet) \leq d^*(\bullet)$  - відстань Хеммінга,

$d^*(\bullet)$  - поріг відстані Хеммінга.

Змістовний аналіз значення (4.29) показав [100], що область його застосування обмежена з-за вимоги рівності потужності дискрет функцій належності, що не завжди має місце внаслідок різної величини  $X_0$ , а також різного значення дискретизації на множині функцій.

Таким чином, ми можемо сформулювати таке твердження.

**Твердження 4.2.** Якщо існують функції приналежності [95] на деякій області їх визначень  $[0, X_0]$  на множині факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$ , то ефективним є фактор, для якого екстремум лінійного індексу нечіткості Хеммінга [14] приймає значення:

$$\frac{2}{n} d(\mu(\overline{\tilde{\Phi}_k}), \mu(\tilde{\Phi}_k)) \rightarrow extr, \quad (4.30)$$



де  $\mu(\overline{\tilde{\Phi}_k})$  – чітка множина дискрет функції належності найближча до нечіткої, причому її значення визначено як [14]:

$$\mu(\overline{\tilde{\Phi}_k}) = \begin{cases} 1, \mu(\tilde{\Phi}_k) \geq 0.5, \\ 0, \mu(\tilde{\Phi}_k) < 0.5. \end{cases} \quad (4.31)$$

Вірогідність значення (4.31) є вірною з постановки задачі і сутності лінійного індексу нечіткості. Вірогідність даного підходу безпосередньо витікає з того очевидного факту, що для (4.31) відсутня вимога рівності потужності дискрет для різних факторів з  $\Phi_k$ .

Розглянемо два випадки для визначення значення (4.30).

**Твердження 4.3.** Якщо існують функції належності [98] на деякій області їх визначень  $[0, X_0]$  на множині факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$ , то ефективним є фактор, для якого екстремум лінійного індексу нечіткості Хеммінга [14] приймає значення:

$$\frac{2}{n} d(\mu_{\overline{\Phi_k}}, \mu(\Phi_k)) = \max, \quad k \in I. \quad (4.32)$$

В (4.32) – це погляд «оптиміста», який дозволяє виділити з множини факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$  максимальне значення індексу. Такий підхід, при всій його складності і можливо недостатньому обліку інших, менш значущих (пагано визначених факторів), дозволяє оперативно здійснювати грубі оцінки на множині факторів. Дії відповідно (4.32) здійснюємо на всій множині факторів з наступним розглядом деякого фактору, для якого справедливо (4.32).

Важливо також розглянути випадок, коли здійснюється пошук (4.30) з точки зору гірших оцінювань або «песиміста».

**Твердження 4.4.** Якщо існують функції належності [98] на деякій області їх визначень  $[0, X_0]$  на множині факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$ , то ефективним є фактор, для якого екстремум лінійного індексу нечіткості Хеммінга [14] приймає значення:

$$\frac{2}{n} d(\mu_{\overline{\Phi_k}}, \mu(\Phi_k)) \rightarrow \min, \quad k \in I. \quad (4.33)$$

Очевидно цей індекс (4.33) належить погляду «песиміста». Дії відповідно (4.33) здійснюємо на всій множині факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$  з наступним розглядом деякого фактору, для якого справедливо (4.33).

**Розробка технології прийняття рішень на множині факторів і альтернатив.** Змістовний аналіз існуючих рішень показав, що в даному випадку реалізовано таку стратегію:

1. Виділивши область досліджень (множину земельних ділянок  $\{Z_\lambda\}$ ,  $\lambda \in \Lambda$ ), здійснюємо виділення і обґрунтування множини важливих факторів  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$ .

2. Формуємо області значення характерних функцій належності [14], визначаємо множину параметрів [5] для термів лінгвістичних змінних:

$$\mu(x) = e^{-k_1 x^2}, \quad k_1 > 0 \text{ – «мале значення»,} \quad (4.34)$$

$$\mu(x) = e^{-k_2 (x-a)^2}, \quad k_2 > 0 \text{ – «середнє значення»,} \quad (4.35)$$

$$\mu(x) = 1 - e^{-(x-b)^2}, \quad k_2 > 0, \quad x > b \text{ – «велике значення»,} \quad (4.36)$$

де  $k_1, k_2, k_3$  - коефіцієнти крутизни функцій (4.34 – 4.36),

$a, b$  - деякий зсув нульових значень функцій (4.34 – 4.36).

3. Використовуючи знання експертів, здійснюємо настроювання параметрів функцій належності (4.34 – 4.36). При цьому реалізуємо дві стратегії:

- використовуючи знання експертів, здійснюємо зрушення нульових значень функцій (4.35), (4.36) до отримання очікуваних їх значень на множині аргументів  $[0, X_0]$ . Очевидно, що такі рішення носять достатньо обмежений характер;

- використовуючи основні положення роботи [95], реалізуючи процедури нечіткого логічного виводу і знання експертів про предметну область, виконуємо процедури настроювання функцій (4.34 – 4.36) з застосуванням багатозначної логіки.

Враховуючи, що в [95] часові показники складності методу на основі модифікації методу дихотомії можуть бути покращені за допомогою введення можливості оптимізації параметра самого алгоритму шляхом застосування принципів нечіткої логіки і ранжування, здійснимо таку стратегію:

- Фаззифікація правил продукцій, вибір типів функції належності.
- Використовуючи експертні оцінки, задаємо параметри функцій належності.
- Виконуємо рішення задачі нечіткого логічного виведення.
- Дефаззифікація нечіткого логічного виведення.
- Визначення оцінки очікуваного дефаззифікованого значення –  $y_{(очік)}$ .
- Задання параметрів  $d_2, \Delta d, \varepsilon$ .
- Запуск процесу ітераційної апроксимації.
- Останов процесу при досягненні необхідної точності  $\varepsilon$ .
- Визначення оптимальних за критерієм складності значень множника дихотомії  $m$  для різних типів функцій належності.

Видача рекомендацій по оптимальному значенню множника для конкретного типу нечіткої величини функції належності з використанням критерію ранжування.

Повторний прогін, уточнення параметрів дихотомії в багатозначній інтерпретації.

Уточнення параметрів  $k_1, k_2, k_3$ . Останов.

4. Використовуючи один з підходів (4.32) або (4.33) по настроюванню з урахуванням пункту 3 функцій належності (4.34 – 4.36), здійснюємо формування

упорядкованих параметрів за відповідним критерієм з  $\Phi_k \subseteq \Phi_i$  із наступною оцінкою ступеню привабливості (і, відповідно, ціни) визначених ділянок.

Ступінь привабливості у загальному вигляді може бути представлена у вигляді деякої характеристичної функції належності у вигляді

$$\mu_{cn} = 1 - e^{-k_c (x-z)^2}, \quad (4.37)$$

де  $k_c$  – ступінь крутизни,  $z$  - деяка константа, причому  $k_c > 0$ ,  $x > z$ .

5. При наявності множини факторів, які володіють близькими значеннями індексу нечіткості [95] може бути сформовано деяку підмножину факторів, для яких визначається множина альтернатив  $At_m$  за критерієм мінімального часу освоєння території.

$$At_m = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i, \quad \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i \rightarrow \min. \quad (4.38)$$

6. Критерії (4.38) можуть уточнюватись шляхом додаткового підключення деяких супутніх факторів і критеріїв.

Використання запропонованого підходу в задачах оцінки міських територій, а також земель різного призначення дозволили отримати позитивну оцінку методичних і програмних засобів їх реалізації на реальному об'єкті, підвищити якість у прийнятті рішень.

## Висновки до розділу 4

1. Запропоновано та реалізовано новий підхід до моделювання нечіткого логічного виводу про стан складного об'єкта, який враховує неточності в базі даних та невпевненості в базі знань. Для моделювання логічних міркувань в умовах невизначеності отримали подальший розвиток мережева модель на основі нечіткої інтервальної логіки. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність рішень, що приймаються в умовах невизначеності та жорстких обмежень на ресурси.

2. В результаті аналітичних досліджень визначено, що найбільш прийнятним для настроювання параметрів функції належності є вдосконалений метод бінарного пошуку та його розвиток на основі багатозначної логіки. Запропоновано розширений метод дихотомії для задачі настроювання параметрів функції належності, який заснований на завданні необхідної точності підбору параметрів і необхідної швидкодії. Визначено обчислювальну складність рішення поставленої задачі за критерієм витрат часу, що є близькою до експоненціальної від вибраної точності обчислення.

3. В результаті проведеної модифікації було покращено швидкість збігу запропонованого раніше алгоритму підбору параметрів нечітких функцій належності введенням методів оптимізації часової складності при зміні коефіцієнта поділу бінарного пошуку. Модифіковано класи програмної реалізації моделі з метою впровадження нового функціоналу алгоритму в програмній реалізації. Розробка та подальше удосконалення методів оперативного настроювання параметрів нечітких систем є перспективним напрямом в області фаззи технологій і систем предметних областей.

4. Запропоновано структуру класів модифіційованих програмних засобів рішення прикладних задач на просторово розподілених об'єктах кадастрових систем. Підтверджено ефективність підходу.

5. Отримали подальший розвиток методи оцінювання складних об'єктів, що функціонують в нечіткому просторі станів та відрізняються використанням методів оптимізації у сенсі обробки процесів нечіткої логіки, індексів нечіткості з наступним упорядкуванням множини факторів і вибору альтернатив на множині рішень за критерієм мінімуму затрат часових ресурсів.

6. Перспективним напрямом подальших досліджень є удосконалення критеріїв, методів, алгоритмів та програмного забезпечення на множині альтернатив у прийяття відповідальних рішень. Подальші підходи визначають доцільність застосування знання орієнтованих технологій для прийяття рішень в нечіткому просторі станів.

## **РОЗДІЛ 5**

### **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОЦІНЮВАННЯ СТАНІВ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ**

#### **5.1 Інформаційні технології аналізу процесів оцінювання простору станів складних технологічних об'єктів на основі запропонованих нових методів і моделей**

Аналіз теоретичних результатів, моделей, методів та підходів до оцінки технічного стану складних технологічних об'єктів показав, що для їх практичної реалізації доцільно виконати такі дії:

- на основі вивчення нормативної бази та особливостей предметної області виділяємо множину процесів, їх характер, причинно-наслідкові зв'язки, критерії оцінки та обмеження на функціонування технологічного об'єкта;
- формуємо структуру, алгоритми функціонування об'єкта, визначаємо множину чинників та параметрів, що визначають стійке функціонування об'єкта;
- використовуючи розглянуті вище правила інтерпретації, будуємо моделі процесів аналізу та оцінки стану об'єкта;
- на основі розроблених методів здійснюємо аналіз моделей за критеріями досяжності та несуперечливості прийняття рішень з урахуванням стану об'єкта з подальшою модифікацією моделей і процесів;
- на основі розроблених методів здійснюємо аналіз процесів і вибір альтернатив в реалізації процесів прийняття рішень на множині критеріїв і обмежень предметної області;
- реалізуємо множину рішень з оцінки технічного стану об'єкта і можливих шляхів усунення відповідних неадекватностей.

**Методичні аспекти побудови моделей процесів аналізу та оцінки стану складних об'єктів** засновуються на правилах інтерпретації моделей, які досить глибоко досліджені в роботах [77, 102, 103]. Процеси та їх взаємодія можуть бути представлені зазвичай у вигляді граф-схем алгоритмів, логічних функцій, сукупності продукційних правил, вербального опису та ін. Для випадку представлення процесів та їх взаємодії графами-схемами алгоритмів їх інтерпретація фрагментами моделі [102, 103] подана на рис. 5.1.

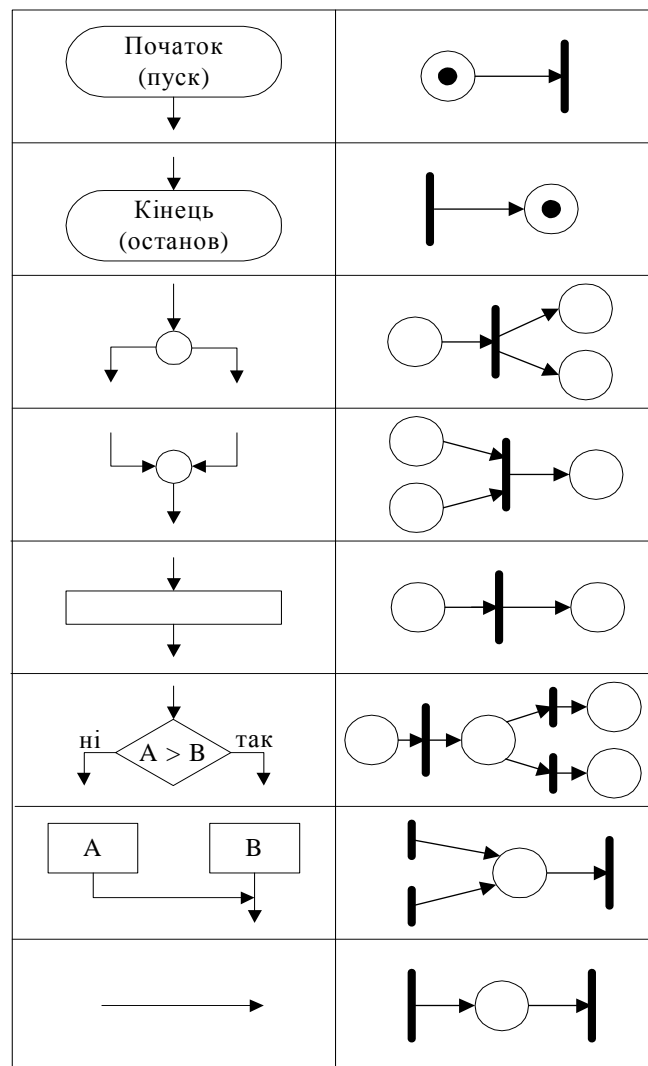


Рис. 5.1 – Інтерпретація фрагментів мережевої моделі

Якщо, наприклад, процеси в базах знань задані правилами продукцій вигляду *if / then*, то зрозуміло, що ці правила можуть бути відображені

фрагментами мережевих моделей аналогічно відображенню взаємодіючих процесів комплексом логічних функцій [103].

Для інтерпретації міжрівневих зв'язків моделі приймається рішення з множини рішень [61, 67]. Простір станів процесів представимо в просторі станів моделі.

**Методичні аспекти аналізу на моделі властивостей досяжності і несуперечності прийняття рішень з урахуванням стану об'єкта.** Нехай існує множина нечітких процесів (1.1) [53] і деякі з них відображають ієрархію при взаємодії рівнів, що реалізують деякий комплекс взаємодіючих задач  $T_s$ . Аналіз процесів здійснюється на моделі (3.12).

Використовуючи результати досліджень, наведених у розділі 3, для відображення і формалізації процесів на моделі прийmemo такі правила інтерпретації компонент моделі: множина нечітких переходів моделі інтерпретує множину дій нечітких процесів, що моделюються; множина нечітких позицій моделі інтерпретує множину нечітких умов виконання на множині дій; функція кольору маркера, інтерпретує множину ознак маркера, що відображує деяку суть об'єкта моделювання; динаміка процесів, що моделюються інтерпретується переміщенням нечітких маркерів на множині позицій через множину нечітких дозволених переходів; простір станів динамічних взаємодіючих нечітких процесів інтерпретується множиною векторів маркірування множини позицій в просторі станів моделі.

Методично процедура **аналізу досяжності** може бути представлена у вигляді послідовної реалізації таких дій:

- на основі запропонованої вище інтерпретації, з урахуванням положень нормативної бази і знань експертів, визначається склад, відношення (рис. 5.2) і особливості компонент моделі, будується модель та її простір станів у вигляді (3.14) з урахуванням розширень структури моделі (2.27).



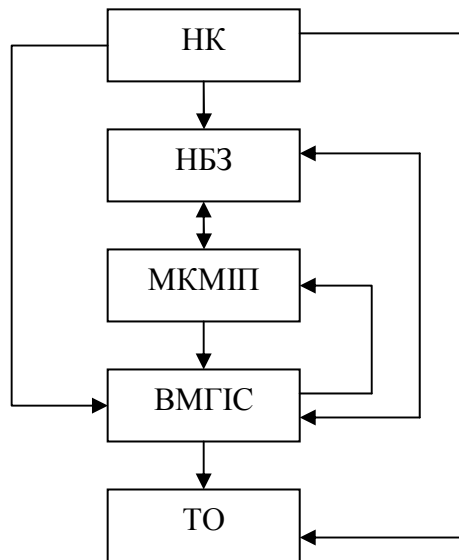


Рис. 5.2 – Відношення компонентів моделі

Згідно з рис. 5.2, модель (2.27) (рис. 3.1) представлена у вигляді відношень таких компонент:

- а) НК – нормативна компонента;
- б) НБЗ – нечітка база знань;
- в) МКМІП – мережеві компоненти моделювання ієрархічних нечітких процесів оцінки технічного стану складних об'єктів;
- г) ВМГІС – відображення, моделювання процесів просторових компонент засобами ГІС;
- д) ТЕ – технологічний об'єкт.

Виконуємо такі дії:

- аналізуємо досяжності цілей на мережевих моделях (рис. 5.2) за критерієм (3.17);
- якщо умова (3.19) виконуються, то за даними критеріями існує досяжність процесів при прийнятті рішень. Інакше необхідно реалізувати дії згідно з методом прямого і зворотного аналізу простору станів моделі з подальшою модифікацією моделей і процесами (п.1–п.4 методу розділу 3). Модифікація здійснюється шляхом цілеспрямованих дій до забезпечення умов (3.26)–(3.29);

- якщо дії згідно з (3.26)–(3.29) не призводять до дозволеності деяких переходів, то необхідно модифікувати структуру моделі на всіх ієрархічних рівнях з метою адекватного відображення логіки взаємодії процесів предметної області таї виконання умови (3.17).

Методично процедура *аналізу властивостей несуперечності* може бути представлена у вигляді послідовної реалізації таких дій:

- на основі запропонованої вище інтерпретації будуємо модель і її простір станів у вигляді (3.12);

- виконуємо аналіз досяжності за критерієм (3.17), за необхідності здійснюємо модифікацію структури моделей і процесів до забезпечення адекватного відображення логіки взаємодії процесів предметної області і виконання умови (3.17);

- запустити модель на виконання на множині векторів початкових маркіровок;

- якщо на деякому кроці моделювання, який визначається зміною векторів поточного маркірування, для деякого вектора не виконується умова (3.30), то модифікуємо структуру моделі на всіх ієрархічних рівнях з метою адекватного відображення логіки взаємодії процесів предметної області і виконання умови (3.30);

- якщо для деякої поточної маркіровки, при виконанні всіх дій з множини можливих модифікацій, не буде виконуватися умова (3.30), то здійснюється зворотний покроковий цілеспрямований аналіз структури моделі та її простору станів, локалізується відповідна неадекватність з модифікацією структури моделі на всіх ієрархічних рівнях для адекватного відображення логіки взаємодії процесів предметної області, виконання умови (3.31) і забезпечення несуперечності процесів.

**Методичні аспекти виявлення і вибору альтернатив на основі мережевих моделей в задачах аналізу стану складних технологічних об'єктів.** Методично процедури виявлення і вибору альтернатив можуть бути представлені у вигляді послідовної реалізації таких дій:

- на основі аналізу предметної області визначаємо множину критеріїв і обмежень вибору альтернатив. Для реальних систем це: якість управління, показники надійності, вартісні та часові показники;
- реалізовуємо розглянуті вище процедури для аналізу та забезпечення досяжності та несуперечності моделей і процесів;
- розглядаючи задачу, що вирішується, як задачу оптимізації, введемо поняття динамічних ієрархічних об'єктів і представимо ієрархічну модель (рис. 5.2) у вигляді взаємодіючих динамічних об'єктів, для яких визначаємо відповідні формати;
- реалізуємо модифікований алгоритм побудови дерева досяжності [68] і його розширення на випадок пошуку альтернатив на ієрархічних нечітких мережевих моделях;
- за наявності альтернатив вирішуємо задачі (3.32), (3.33) і формуємо рекомендації по шляхах прийняття рішень на множині альтернатив.

## **5.2 Структура і функції програмних засобів аналізу і оцінки технічного стану складних технологічних об'єктів**

Структура програмних засобів аналізу стану об'єкта і прийняття рішень про його стан реалізована шляхом інтеграції таких програмних продуктів: інструментальних засобів аналізу ієрархічних нечітких мережевих моделей (HFPN) [79]; програмної оболонки реалізації геоінформаційних технологій ArcGis [104, 105]; програмних продуктів реалізації сервісних функцій (Adobe Photoshop [106]; Scan Edit).

Інструментальні засоби HFPN реалізації розроблених методів і алгоритмів в задачах моделювання і аналізу процесів прийняття рішень є

подальшим розширенням засобів FPN [51] на випадок моделювання і аналізу ієрархії класів нейро-фаззі мережевих моделей, вони значною мірою враховують специфіку вирішення поставлених в роботі задач. Для прив'язки та інтеграції просторової інформації застосована одна з версій програмного продукту ArcGis [104]. Планшети інтегровані в програмному середовищі ArcGis [104] як растрові інформаційні шари з подальшою векторизацією. Додаток ArcMap [105, 107] дозволяє здійснювати розв'язання типових задач мережевого аналізу. До них, насамперед, належать: аналіз повідомлень на несправності; трасування та аналіз ізоляції; трасування та аналіз забруднень.

**Структура і функції програмних засобів HFPN.** Програмний продукт HFPN розроблений з використанням об'єктно-орієнтованих технологій [108-111] в середовищі Microsoft Visual Studio мовою C#.

Реалізуються такі основні функції:

- навчання побудови моделей;
- автоматизоване генерування і редагування моделей і відношень ієрархічних рівнів моделі;
- настройка функцій належності та параметрів моделі;
- моделювання та аналіз адекватності і динаміки взаємодії процесів за заданими формальними критеріями;
- вибір альтернативних шляхів взаємодії процесів;
- аналіз результатів моделювання;
- формування рекомендацій з побудови модифікованих моделей за результатами моделювання і аналізу та з модифікації процесів предметної області.

У даній реалізації структуру мережі Петрі представлено матрицею інцидентності  $H$  у просторі станів [77], що дозволяє використати алгоритми аналізу матриць [63]. Елемент матриці представлений у вигляді (2.30).

Враховуючи нечіткість функції інцидентності мережевої моделі (3.14), в даній реалізації використано також нечітку матрицю інцидентностей, елемент  $\alpha_{\tilde{H}(f)}$  матриці представлений у вигляді (2.31) [51].

Реалізація аналізаторів в програмному продукті HFPN заснована на взаємодії декількох класів. Діаграма класів і схема взаємодії представлена на рис. 5.3.

**Клас *FileProcessor*** забезпечує імпорт даних з інших програм завдяки гнучкій настройці функції парсера вхідних даних. Він побудований на базі шаблону «Адаптер», призначеного для структурування об'єктів і класів, а також «Посередник» – шаблону поведінки об'єктів. Особливістю реалізації даного класу є також одночасне використання шаблону «Singleton» – паттерна, породжуючого об'єкти. Доцільність використання даних шаблонів проектування така:

1. Оскільки кожний раз ми маємо справу з різним інтерфейсом входу і виходу (спочатку невідомий формат імпорту файла), то необхідно перетворювати дані інтерфейси і надавати міст, який би надавав можливість використати дані класу всередині програми. Використання даного шаблону дозволило забезпечити спільну роботу класів з несумісними інтерфейсами.

2. Паттерн «Посередник» дозволяє визначити об'єкт, що інкапсулює спосіб взаємодії на множині об'єктів. Посередник забезпечує слабку зв'язаність системи, позбавляючи об'єкти від необхідності явно посилатися один на одного і дозволяючи тим самим незалежно змінювати взаємодію між ними. Використання даного шаблону забезпечує гнучкість внутрішнього представлення даних, що завантажуються.

3. Паттерн «Одинак» необхідний, оскільки логічно необхідний тільки один об'єкт представлення даних, що обробляються та завантажуються. Використання паттерна гарантує, що у класу буде тільки один примірник і надає до нього глобальну точку доступу.

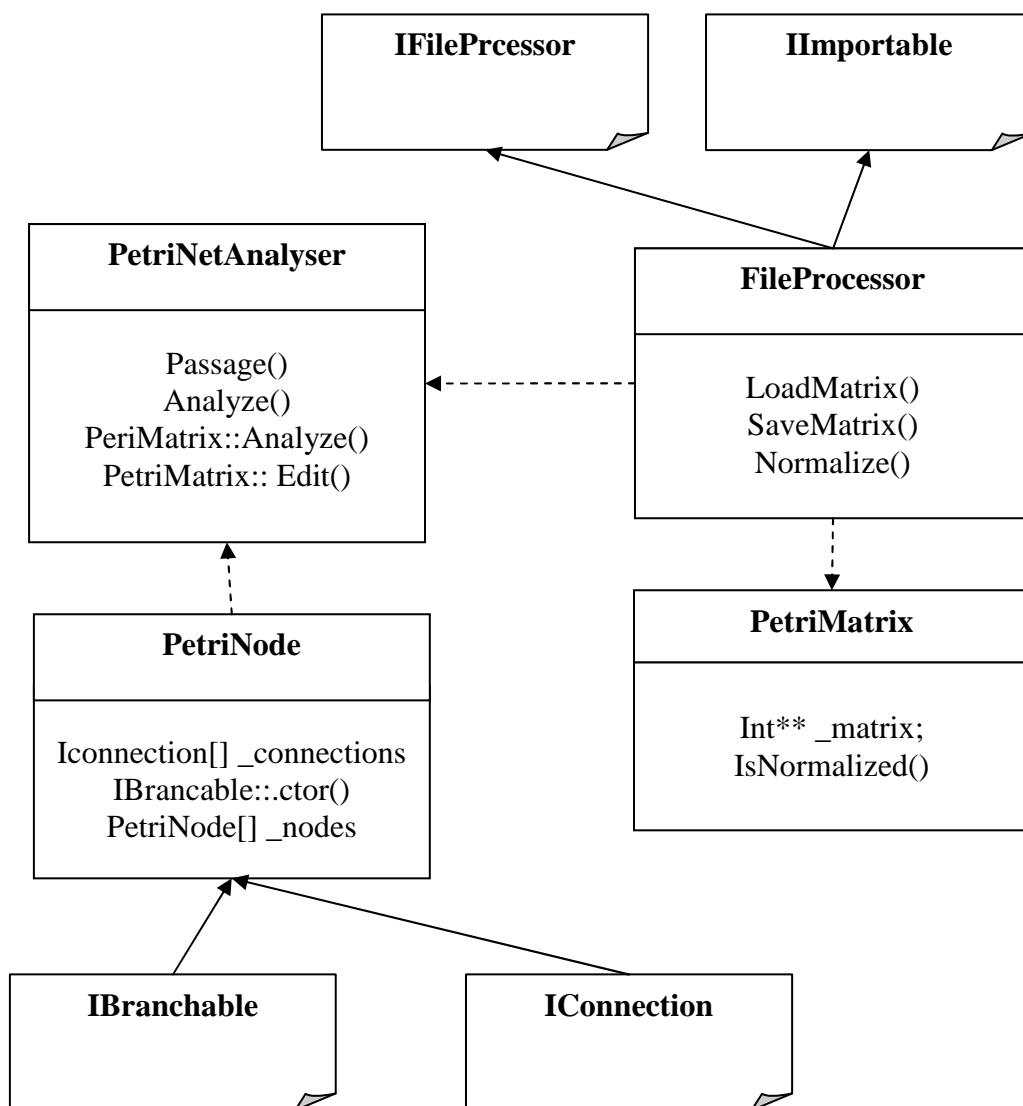


Рис. 5.3 – Діаграма класів

**Клас *PetriNetAnalyser*** надає функції для обробки завантажених матриць інцидентностей (2.30), (2.31). Даний клас використовує алгоритми інтелектуального обходу матриць з використанням алгоритмів пошуку і прямої побудови маршрутів. Функціонал класу забезпечує побудову фронтів пошуку всіх критично важливих точок мереж Петрі (точок розпаралелювання та розгалуження, початку і кінця) і дозволяє детально проаналізувати мережу на можливі суперечливості та альтернативи.

Під час проектування даного класу були використані такі шаблони:

1. «Компонувальник» - дозволяє групувати об'єкти в деревоподібні та циклічні взаємопов'язані структури для представлення ієрархії типу

«частина—ціле». Даний паттерн дозволяє обробляти всі взаємопов'язані об'єкти мережі Петрі як єдине ціле, а також виділяти підмережі і обробляти їх паралельно як субструктури (при цьому відстежуючи взаємозв'язки загалом). У нашому випадку ми повинні будувати складні діаграми з більш простих компонентів. Компонувальник дозволяє найбільш просто згрупувати дрібні компоненти (вузли і зв'язки) для формування більш великих, які в свою чергу можуть стати основою для створення ще більш великих. Завдяки даному паттерну мережа Петрі представляє ієрархічні структури у найбільш зручний та гнучкий спосіб. Паттерн «Компонувальник» також описує, як можна застосувати рекурсивну композицію так, що б не встановлювати відмінність між простими і складними об'єктами.

2. «Будівник» – дозволяє відділити конструювання складного об'єкта від його представлення, дозволяючи використати один і той самий процес конструювання для створення різних представлень. Це поліпшує модульність, інкапсулюючи спосіб конструювання і представлення складного об'єкта. Також будівник надає більш тонкий контроль над процесом конструювання.

3. «Фасад» – надає уніфікований інтерфейс до множини інтерфейсів у деякій підсистемі. Визначає інтерфейс більш високого рівня та полегшує роботу з підсистемою.

**Інтерфейси *IFilePrcessor* та *Iimportable*** надають загальні функції для завантаження в програму файлів з інших пакетів із збереженням сумісності. Завдяки ним в програмі існує гнучкий механізм підбору формату завантаження і збереження матриць інцидентностей.

**Інтерфейси *Ibranchable* та *Iconnection*** відповідальні за репрезентацію зв'язків в мережевих моделях на основі мереж Петрі, а також за логічне представлення в пам'яті понять «розгалуження» і «розпаралелювання».

**Клас *PetriMatrix* і *PetriNode*** необхідний для зручної репрезентації матриці інцидентностей в пам'яті та інкапсуляції доступу до неї. Даний клас надає доступ до елементів і стежить за коректністю значень в ній, запобігаючи можливим конфліктам при парсингу даних.

**Клас *PetriNode*** призначений для репрезентації вузла мереж Петрі в пам'яті. Містить посилання на зв'язки та інші вузли, а також надає інформацію, яка може його характеризувати як специфічну точку (точку початку, кінця, розгалуження і т.п.).

Розподілення на підсистеми полегшує проектування складної системи загалом. Загальна мета будь-якого проектування – звести до мінімуму взаємну залежність підсистем і обмін інформацією між ними. Одним із засобів вирішення даної задачі є введення об'єкта «Фасад», що надає єдиний спрощений інтерфейс до більш складних програмних засобів.

У структурі засобів є такі **класи** як *MatrixProvider* (клас представлення матриці інцидентів), *PetriNetNode* (вузол мережі Петрі) і *Connection* (зв'язок). Всі вони використовують інтерфейси *IParsable* та *IConnectible* поряд з детально описаними вище класами *PetriNetAnalyser* і *FileProcessor*. Спільне використання принципів об'єктно-орієнтованого проектування і паттернів програмування дозволило створити гнучку реалізацію програми-аналізатора мережевих моделей.

На рис.4.4–4.9 наведені екранні форми функціонування фрагментів інструментальних засобів HFPN.

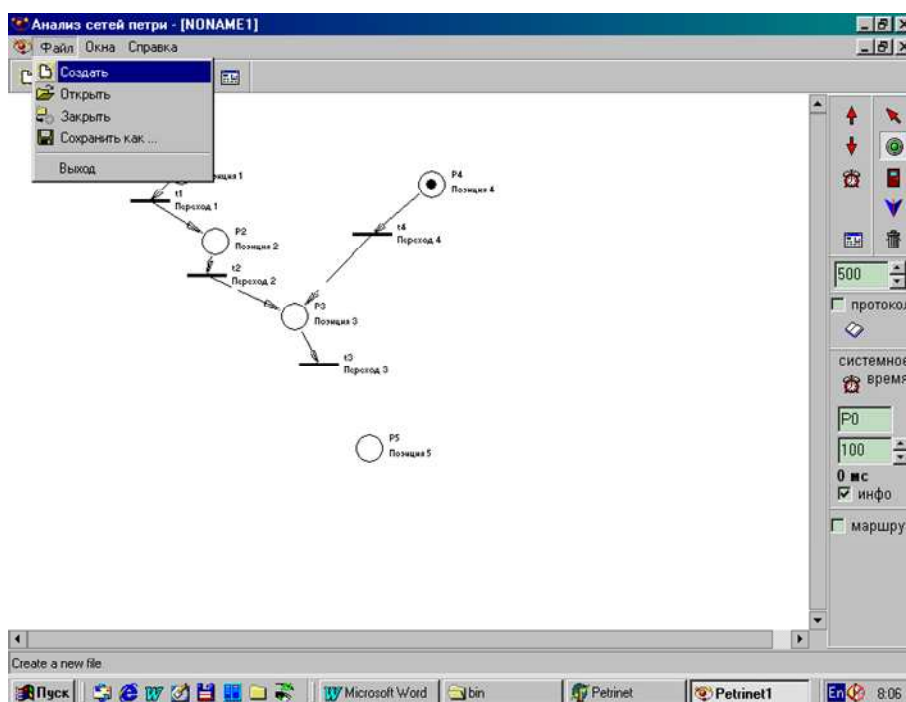


Рис. 5.4 – Побудова моделі



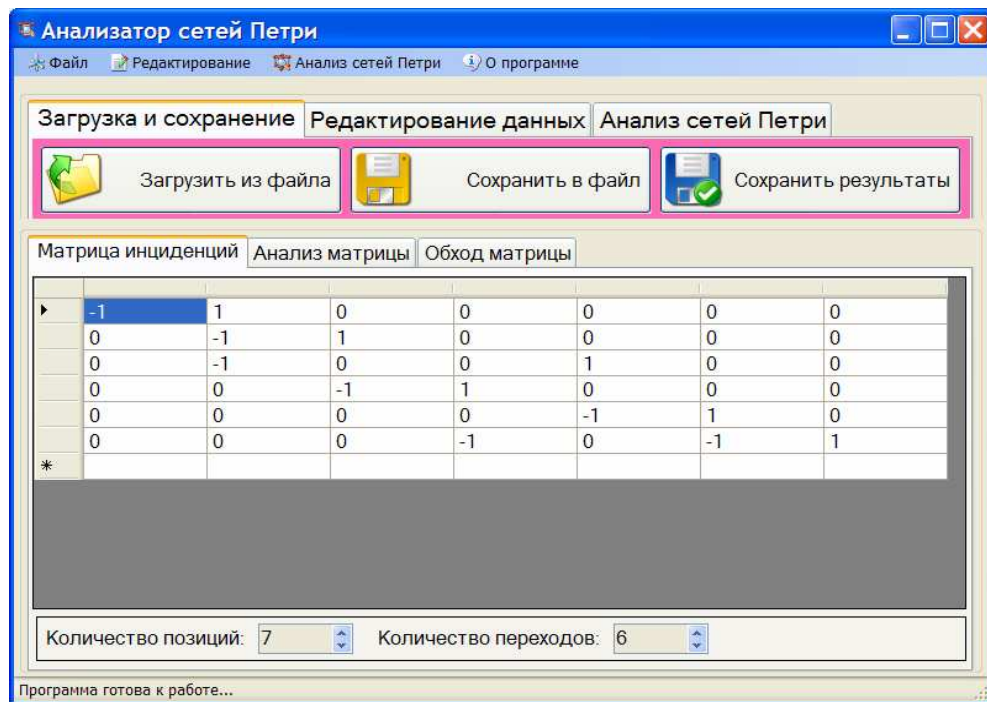


Рис. 5.5 – Редагування матриці інцидентності

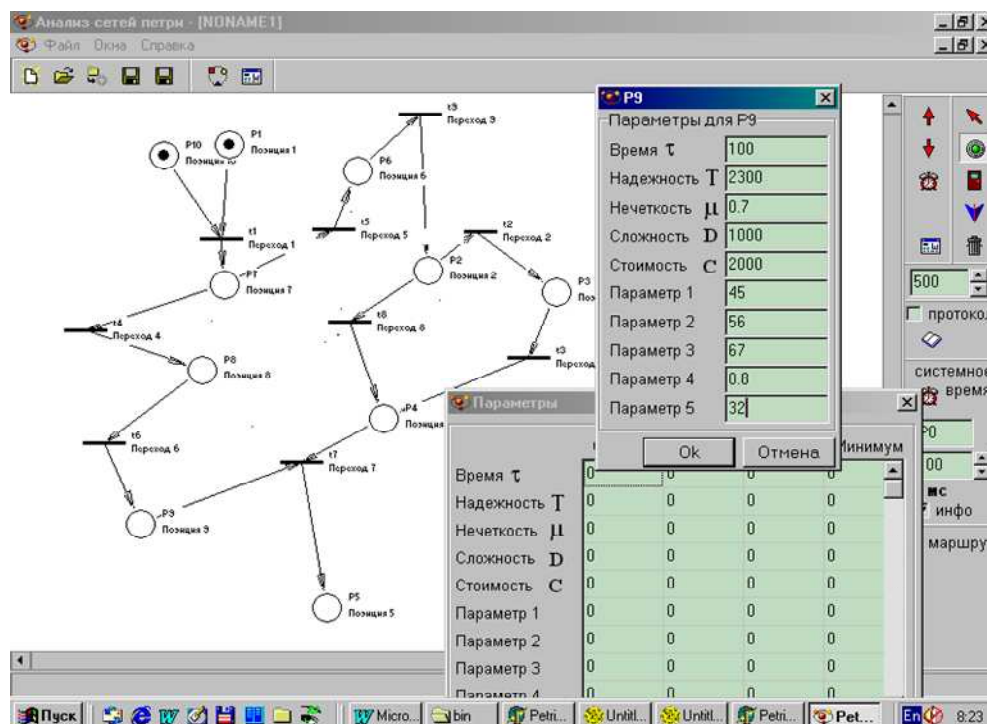


Рис. 5.6 – Формування простору параметрів

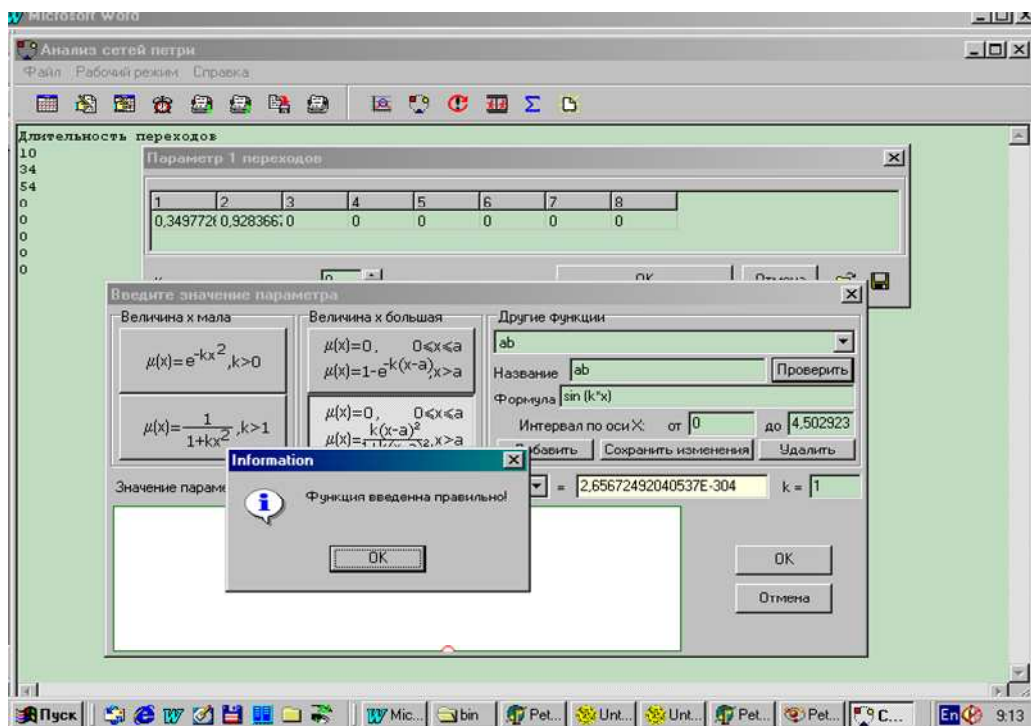


Рис. 5.7 – Аналіз та формування функцій належності

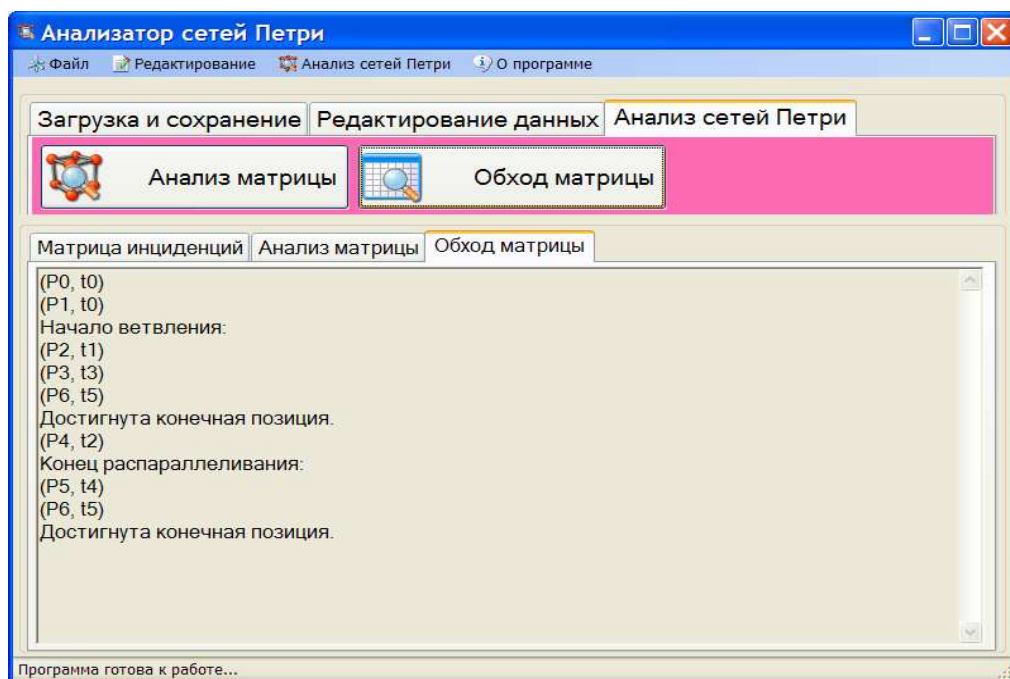


Рис. 5.8 – Аналіз структури моделі

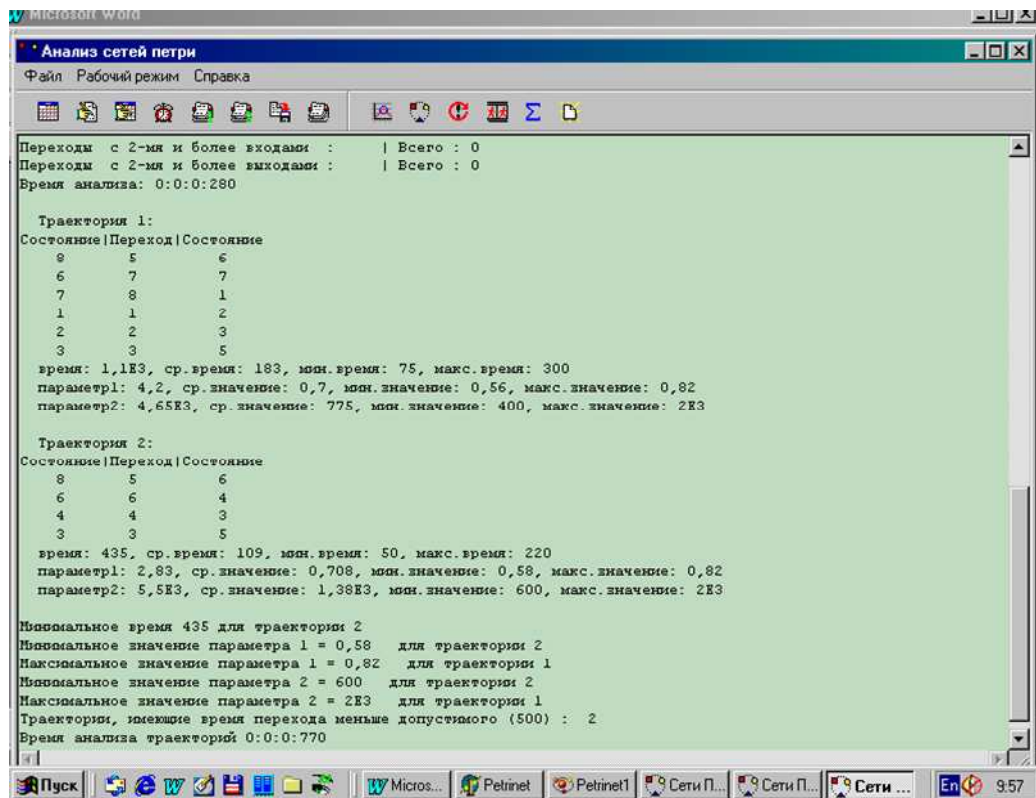


Рис. 5.9 – Моделювання процедур вибору альтернатив (фрагмент)

Розробка інструментальних засобів HFPPN є досить ефективною, що підтверджено впровадженнями на реальному об'єкті. Засоби досить легко пристосовуються до розв'язання задач моделювання і аналізу процесів прийняття рішень на нечітких процесах, представлених на множині відношень «умова–дія» предметних областей.

### 5.3 Інформаційні технології розв'язання прикладних задач аналізу і оцінювання станів просторово розподілених складних об'єктів

**Особливості об'єкта аналізу з урахуванням просторової компоненти.** Одним з найбільш перспективних і доступних видів палива, як для задоволення комунально-побутових потреб населення, так і сировинного наповнення

наукоємних технологій промисловості є природний газ [112–114]. У зв'язку з цим, проблеми забезпечення стійкого транспортування і розподілу газу є досить актуальними і важливими [114, 115]. При цьому потрібно розглядати як організаційні, так і технічні аспекти. Важливою складовою проблеми, що розглядається, є оперативний аналіз і оцінка технічного стану трубопроводів і компонент газорозподілення. Розв'язання проблеми підвищення надійності газопроводів багато в чому пов'язане зі своєчасною і якісною оцінкою їх стану. Отже, об'єктом дослідження є система газозабезпечення, предметом – технічний стан поверхні трубопроводів в умовах невизначеності та жорстких обмежень на часові ресурси.

У всьому світі в цей час ця проблема є дуже важливою і актуальною. Так, зокрема, в роботі [116] розглядається стан і методи контролю стану нафто- та газопроводів на прикладі різних країн всіх континентів. Робиться висновок про необхідність підвищення якості і достовірності оцінки технічного стану транспортних магістралей.

Дослідження і апробація практичних результатів роботи здійснювалися в умовах газорозподільних мереж Харківського регіону. Газорозподільна мережа характеризується: просторовою, територіальною і функціональною розподіленістю; багаторівневим ієрархічним управлінням; виробництвами з безперервним і дискретним характером виробництв і процесів; підвищеними вимогами до надійності і захищеності компонент і об'єкта; істотним рівнем невизначеності, впливом на процеси людського чинника; значним впливом потенційних техногенних аварій і катастроф на екологічний стан навколишнього середовища.

Враховуючи, що для виконання поставлених задач на реальних об'єктах надзвичайно важлива просторова компонента (наприклад, прив'язка до місцевості потенційних джерел аварій і катастроф, місця розташування розподільчої та замикаючої апаратури і т.п.), відповідні рішення мають включати також простір геоінформаційних систем (ГІС), моделей і технологій [104]. Дійсно, як важливі переваги застосування ГІС, можна

виділити [105, 117]: зручне для користувача відображення просторових даних, в тому числі і 3D-відображення і 3D- моделювання; інтеграція даних і знань організаційної і технічної діяльності організації; розширення функціональних можливостей систем і, як наслідок, підвищення вірогідності рішень, що приймаються.

Доцільність застосування ГІС для аналізу стану інженерних мереж в основному зумовлена такими чинниками: інженерні мережі є зручним органічним поєднанням графічних, просторових і описових, на рівні процесів і відношень, даних про розподілений об'єкт; комплексною природою задач, необхідністю узгодженого обліку стану інших інженерних мереж, вимогою застосування моделей не тільки для лінійних і точкових об'єктів, а частіше для складних, нелінійних об'єктів; вимогою аналізу і оцінки коректності топологічної інформації про стан розподілених об'єктів.

**Особливості оцінки технічного стану трубопроводів.** Згідно з діючою «Методикою контролю і оцінкою стану газопроводів», яка заснована на нормативних матеріалах [118], здійснюються такі оцінки:

**1. Статистична оцінка стану матеріалу труби.** Перевірка стану матеріалу труби проводиться у всіх шурфах, які виринаються в процесі експлуатації з метою проведення ремонту ізоляції на металевій вставці або усунення джерел газу, а також при обстеженні газопроводу, яке проводиться з метою призначення його на ремонт або заміну. Результати огляду і ступень корозії відображаються в паспорті технічного стану газопроводу за чотирибальною шкалою.

**2. Статистична оцінка якості зварних швів.** Контроль якості зварних швів на діючих газопроводах проводиться у випадках, коли за час експлуатації на даному газопроводі спостерігалися випадки розкриття або розриву зварних швів, а також, якщо під час останньої перевірки газопроводу на герметичність встановлено, що місцем витікання газу є неякісний зварний шов. Якість

сталейних зварних швів визначається за трибальною шкалою на основі даних ультразвукового контролю [119, 120].

**3. Статистична оцінка корозійного стану газопроводів.** Стан підземних газопроводів *визначається*:

- наявністю анодної і знакозмінної зон, які викликані блукаючими струмами;
- наявністю захисних потенціалів на газопроводі;
- корозійною активністю ґрунту.

Наявність блукаючих струмів визначають за результатами вимірювань різниці потенціалів між газопроводом і землею. Зміна різниці потенціалів за величиною і знаком або тільки за величиною вказує на наявність блукаючих струмів. Величина різниці потенціалів вказує на корозійну небезпеку, що визначається нормативною базою [118].

Не вдаючись в технологічні аспекти проведення та оцінки технічного стану газопроводів, зазначимо, що ці оцінки багато в чому не досконалі, суб'єктивні, а в ряді випадків виставляють вимоги, які важко реалізуються в польових умовах. Це особливо стосується зимових і осінніх умов нашого кліматичного поясу. Так, згідно з методикою [118], для визначення міри корозії труби необхідно з мінімальною точністю до 0.05 мм оперативно виміряти глибину іржавої плями (без зазначення методики, вимірювальних інструментів, міри очищення при підготовці поверхні, що вимірюється і т.п.). Отже, при виникненні потенційно аварійної ситуації методики, що пропонуються, не є ефективними та достатніми для випадків оперативної оцінки стану при жорсткому обмеженні на *часові* ресурси.

**Знання-орієнтовані технології оперативного аналізу технічного стану газопроводів.** Як впливає з викладеного вище, існуючі підходи засновуються на суворо регламентованих бальних оцінках стану об'єкта, які регламентуються відповідними методиками, інструкціями, галузевими і державними стандартами, включаючи стандарти СНД [119]. Об'єми і зміст виконаних робіт

з кожної компоненти регламенту також суворо регламентовані. Аналіз показав, що існуючі оцінки технічного стану досить грубі, в ряді випадків і суб'єктивні, істотно залежать від кваліфікації виконавців, не враховують всю множину істотних чинників, збурень, які можуть носити нестійкий характер і погано формалізуються.

У роботі, не виключаючи існуючі методики, інші нормативні документи, запропоновано і доведено до практичних реалізацій підходи на основі отриманих теоретичних положень побудови нечітких моделей і методів оцінки стану складних об'єктів, які доповнюють і вдосконалюють існуючі рішення. При цьому враховується, що мережі газопостачання і газорозподілення розглядаються як ієрархічні багатозв'язні, пов'язані між собою регулятори різних типів і призначення.

**Стратегія** вирішення задачі аналізу і оцінки технічного стану металевих труб газопроводів полягає у такому:

1. Використовуючи положення нормативної бази, визначаємо множину дій на існуючих ієрархічних рівнях для оцінки технічного стану поверхонь металевих труб.

2. Формуємо множину відношень між діями з оцінки технічного стану, часові та ресурсні характеристики, а також обмеження на їх значення.

3. Використовуючи засоби геоінформаційних технологій, формуємо просторову модель розподіленого об'єкта (трубопроводів, замикаючих і регулюючих засобів, що забезпечують об'єкти).

4. Будуємо мережеву модель, що відображає ієрархію процесів, динамічно формуємо для моделі нечіткий простір станів і множину характеристик предметної області.

5. Виконуємо на моделі аналіз досяжності та несуперечності цілей рішень, що приймаються, з подальшою, за необхідності, модифікацією моделі і процесів.

6. Використовуючи засоби зв'язку і Global Positioning System (GPS)-навігації [120, 121], оперативно відображаємо в просторі станів моделі стан трубопровода з дискретністю контролю.

7. При можливості виникнення потенційно небезпечної нештатної або аварійної ситуації на моделі, як рекомендація, реалізовується процес вибору альтернатив на множині можливих дій за критерієм максимальної надійності рішень з урахуванням обмежень на часові і матеріальні ресурси.

8. Використовуючи нечітке логічне виведення Мамдані, реалізовуємо аналіз стану об'єкта і формуємо особі, що приймає рішення, рекомендації з ліквідації потенційно небезпечних аварійних і нештатних ситуацій.

Деталізуємо деякі положення викладеної стратегії. Приймавши, як модель представлення процесів аналізу і технічної оцінки стану поверхні газопроводів, модель (рис. 3.1) і відношення процесів (рис. 5.2), викладемо основні практичні положення впровадженої роботи. Нам представляється, що важливими і актуальними є ситуації, які є потенційно критичними і вимагають високої оперативності у прийнятті рішень.

Для оперативної оцінки технічного стану поверхонь трубопроводів та їх покриття запропоновано відносно легкі і прості для сприйняття і обробки лінгвістичні змінні [14, 121, 51] та їх нечіткі значення типу:

- «покриття «незначне» («дуже», «на значній довжині», «малій ширині», «великій відстані», «глибині», пошкоджено»);
- «трубопровід перебуває в «нормальному» («небезпечному», «предаварійному» тощо) стані»;
- «дії по локалізації, блокуванню, ліквідації неадекватностей не вдається усунути «терміново» («в терміни, визначені ...», «без залучення технічних засобів ...», «із залученням сил МНС ....», «із залученням технічних засобів ...», т.п.), «із залученням (без залучення) медперсоналу ...».

Аналіз показав, що в практичних реалізаціях всі значення лінгвістичних змінних можна звести до видів: «мале» значення; «середнє» значення; «велике» значення. Враховуючи зручність диференціювання функцій належності, їх доцільно представити у вигляді «гауссіанів» [ 72, 124]:

- «мала» величина  $x$  (рис. 5.10).



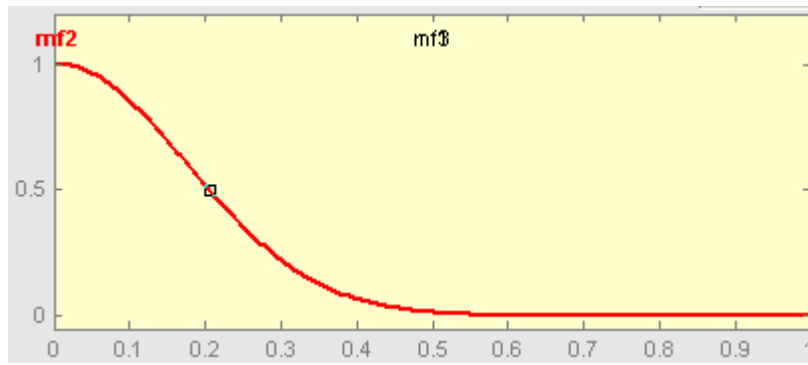


Рис. 5.10 – Функція належності «мала» величина

Аналітична залежність функції приналежності (рис. 5.10) від величини  $x$  має вигляд

$$\mu(x) = e^{-k_0 x^2}, \quad k_0 > 0 ; \quad (5.1)$$

- «середня» величина  $x$  (рис. 4.11).

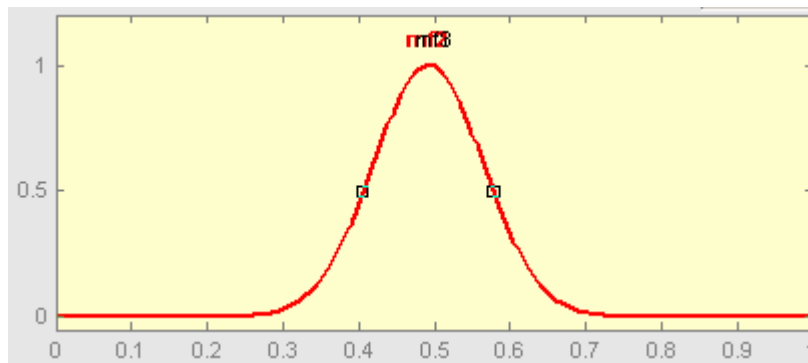


Рис. 5.11 – Функція належності «середня» величина

Аналітична залежність функції приналежності (рис. 5.11) від величини  $x$  має вигляд

$$\mu(x) = e^{-k_1 (x-a_1)^2}, \quad k_1 > 0, \quad a_1 > 0 ; \quad (4.5)$$

- «велика» величина  $x$  (рис. 5.12).

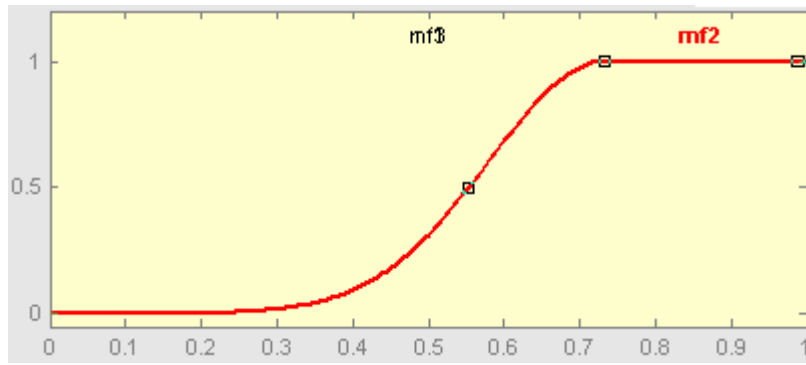


Рис. 5.12 – Функція належності «велика» величина

Аналітична залежність функції приналежності (рис. 5.12) від величини  $x$  має вигляд

$$\mu(x) = 1 - e^{-k_2(x-a_2)^2}, \quad k_2 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_2 \leq x. \quad (5.3)$$

Такий підхід, використовуючи функції приналежності (5.1)–(5.3) та їх похідні, як нелінійні перетворювачі, дозволяє в зручному вигляді представити в базі знань нечіткі правила у вигляді

*if / then*

і застосувати нечітке логічне виведення [102, 104] до нечітких знань про технічний стан трубопроводів.

Представивши *if / then* умови [72] з відомим відношенням  $\tilde{R}(x, y)$  і нечітким значенням антецедента  $\tilde{A}'$  у процедурі прямого логічного виведення GMP, визначаємо наслідок  $\tilde{B}'$ , як розв'язок:

$$\begin{array}{c} \text{if } x \text{ is } \tilde{A} \text{ then } y \text{ is } \tilde{B} \\ x \text{ is } \tilde{A}' \\ \hline y \text{ is } \tilde{B}' \end{array} \quad (5.4)$$

отже:

$$\tilde{B}' = \tilde{A}' \circ \tilde{R}(x, y). \quad (5.5)$$

Розв'язок (5.5) визначаємо, як знаходження [72, 51]:

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu(x, y)], \quad (5.6)$$

з подальшою дефаззифікацією [72] і знаходженням шуканого рішення.

Як приклад, реалізація процедур прямого нечіткого виведення Мамдані [124, 72, 51] за наявності декількох умов антецедента

$$\text{if } (x_1 \text{ is } \mu_1(x)) \& (x_2 \text{ is } \mu_2(x)) \& (x_3 \text{ is } \mu_3(x)) \text{ then } (y \text{ is } \mu_4(y)) \quad (5.7)$$

з подальшою дефаззифікацією (5.7) на основі методу знаходження «центра маси» [72] запропонована на рис. 5.13.

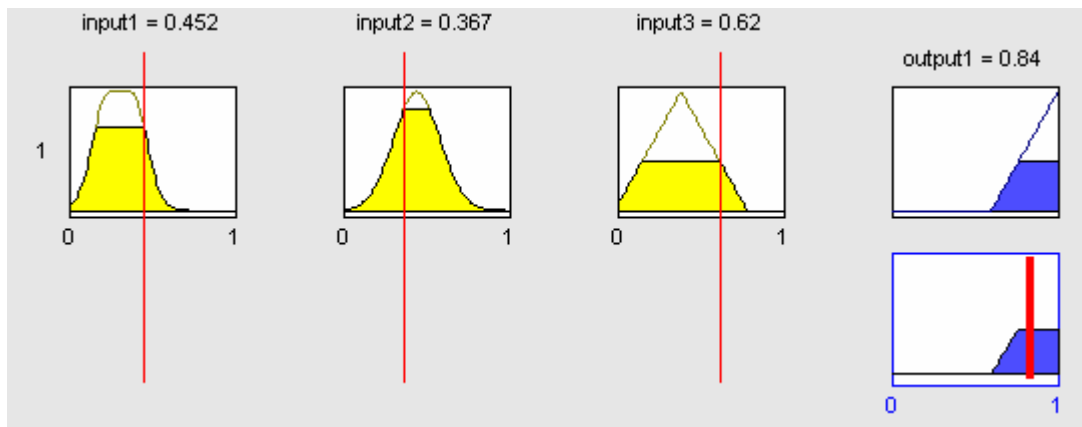


Рис. 5.13 – Нечітке логічне виведення Мамдані

Для оперативного аналізу в роботі запропонована технологія оцінки в нечіткому просторі станів об'єкта на основі моделювання відповідних процедур розширеними нечіткими мережами Петрі [53, 59] з подальшою дефаззифікацією.

Відповідні процедури фундаментально досліджені в роботі [51]. Розглянемо побудову фрагмента моделі, коли процес реалізовується за наявності рівно однієї вхідної і рівно однієї вихідної умови

$$\exists \tilde{t}_i \in \tilde{T} \parallel \{\tilde{p}_i(in)\} \models \{\tilde{p}_i(out)\} = 1. \quad (5.8)$$

Тоді умова (5.6), для фрагмента (5.8), може бути представлена як знаходження

$$\begin{aligned}
 & \text{if } \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } \mu_{\tilde{p}_j}(k) \text{ then } \tilde{t}_i \text{ is } \mu_{\tilde{t}_i}, \\
 & \text{if } \tilde{t}_i \text{ is } \mu_{\tilde{t}_i}(k) \text{ then } \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_i(out)\} \text{ is } \mu_{\tilde{p}_j}, \\
 & \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } z_{\tilde{p}_j}(k), \\
 & \text{-----} \\
 & \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_i(out)\} \text{ is } z_{\tilde{p}_j}(k),
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

де  $z_{\tilde{p}_j}(k)$  в загальному випадку визначено згідно з функцією належності вхідної позиції  $\mu_{\tilde{p}_j}(k)$  в (5.9).

Особливістю рішень [70], прийнятих в даній роботі, є те, що значення вхідного вектора антецедента може бути представлено також нечіткими значеннями, що істотно розширює можливості оцінки технічного стану об'єкта [125, 126]. Конкретне значення аргументу може бути визначене методами дефаззифікації [72] для відповідного фрагмента функції.

Тоді, якщо відповідна функція належності задана в координатах «нечіткий аргумент–значення функції належності», графічне подання функції належності може бути представлено згідно з рис. 5.14.

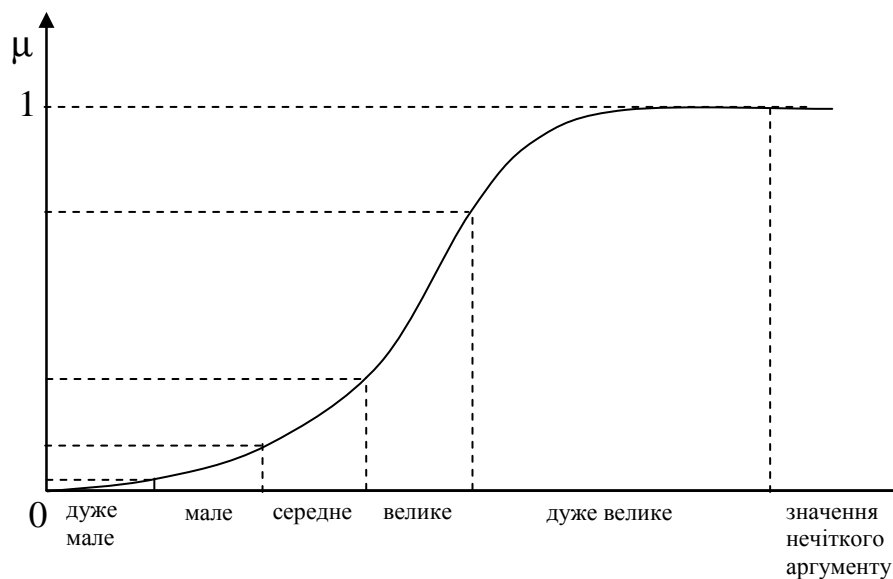


Рис. 5.14 – Функція належності в координатах «нечіткий аргумент–значення функції належності»

**Технологія оцінки технічного стану трубопроводів газотранспортних і газорозподільних інженерних мереж.** Узагальнена структурна схема системи газопостачання запропонована на рис. 5.15 [127].

Для вирішення задачі оцінки технічного стану трубопроводів в роботі запропонована і реалізована технологія, що відображає наведену вище стратегію:

1. Формується нормативна база виконання робіт, вивчаються дані паспортизації діляниць, вузлів, обладнання вузлів, плани, що регламентують обстеження об'єктів, зміст і час виконання робіт, виконавців, форму звітності та ін.

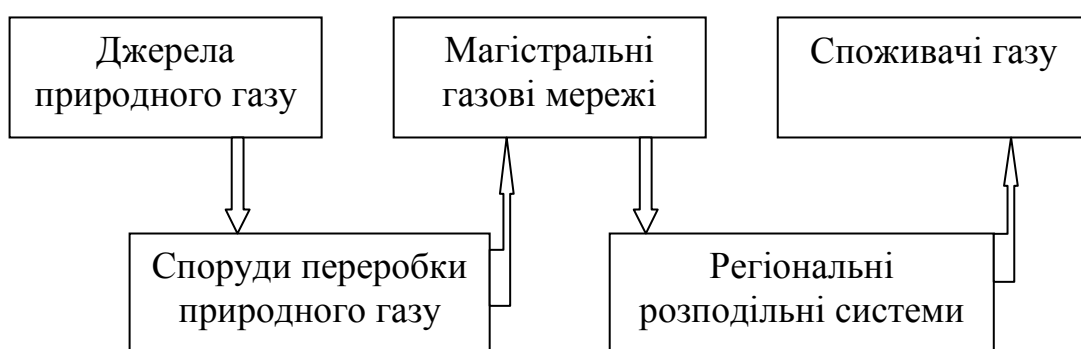


Рис. 5.15 – Узагальнена структурна схема системи газопостачання

2. Реалізовуємо дії згідно з підрозділом 5.1 для об'єкта, що розглядається. Для цього необхідно заздалегідь виконати:

- використовуючи дану інфраструктуру, засоби створення ГІС, формуємо геометричну інженерну мережу. Для цього створюється план мережі (рис. 5.16) і 3D-модель місцевості (рис. 5.17), де (як об'єкти) позначені комунікації інженерної мережі, топологія мережі у вигляді графа. Така технологія забезпечує ідентифікацію об'єктів мережі, виконання розрахунків, процесів геометричного і фізичного моделювання, аналізу стану і режимів функціонування мережі, контроль комунікацій фрагментів мережі та ін.;

- побудувати модель процесів у вигляді (рис. 3.1) з урахуванням відношень (рис. 4.2) і правил інтерпретації (рис. 4.1), алгоритмів

функціонування об'єкта і процедур оцінки, даних нормативної бази, даних інфраструктури і ГІС, знань експертів;

- на основі розроблених методів здійснюємо аналіз адекватності моделі та процесів, аналіз процесів і вибір альтернатив в реалізації процесів прийняття рішень на множині критеріїв і обмежень предметної області;

- використовуючи нечіткі дані про стан поверхні трубопроводів, координати обстеження, на основі моделювання процедур нечіткого виведення Мамдані на нечітких мережах Петрі, реалізовуємо множину рішень з оцінки технічного стану об'єкта і можливих шляхів усунення відповідних неадекватностей.

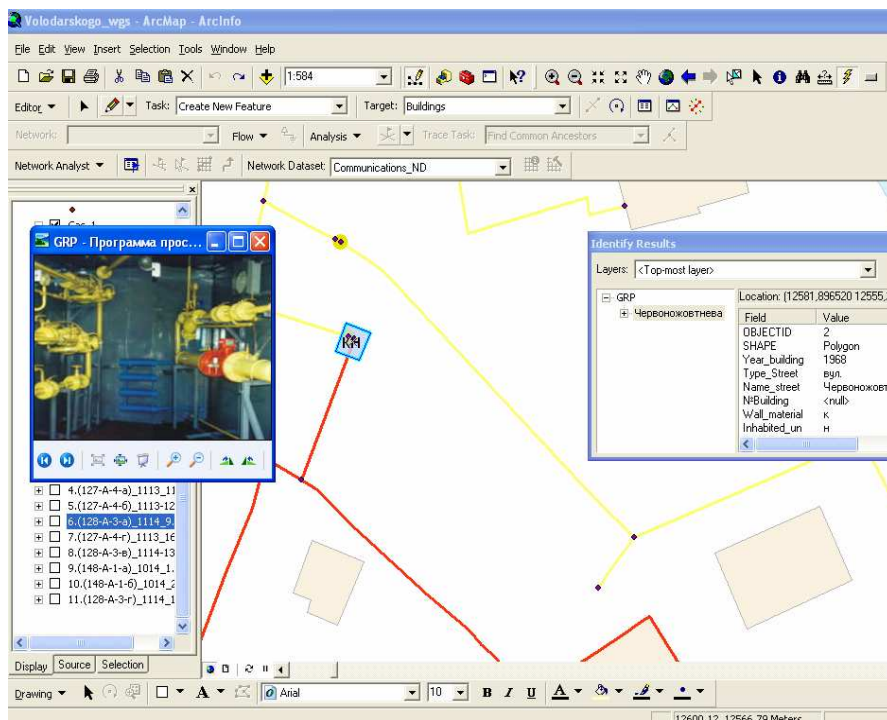


Рис. 5.16 – Ділянка інженерної мережі з атрибутивною інформацією

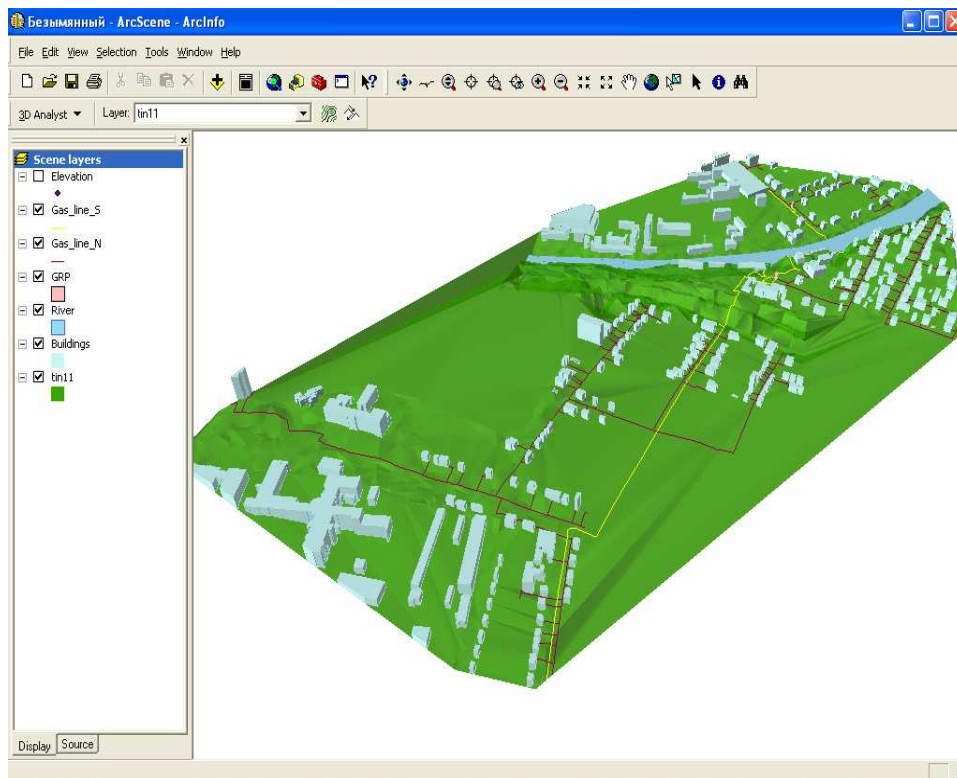


Рис. 5.17 – 3D – модель і її застосування в системі

Ідентифікація потенційних джерел нештатних ситуацій типу аварійного або передаварійного стану трубопроводів здійснюється на основі GPS - технологій [102, 103].

Наведемо *фрагмент* функціонування системи. Фрагмент нечіткої бази знань, ініціалізація якої запускає процеси моделювання на розширених нечітких мережах Петрі, виглядає так:

*If «поверхня труби дуже пошкоджена» & «пошкодження труби на дуже великій довжині» **then** «ділянка трубопроводу є аварійною».*

*If «ділянка трубопроводу є аварійною зі значенням функції» **then** «ділянка трубопроводу потребує термінової заміни».* (5.10)

Фрагмент моделі для (5.10) на основі розширеної нечіткої мережі Петрі показано на рис. 5.18. Для даного фрагмента моделі (рис. 5.18) процедури

нечіткого прямого логічного виведення GMP з урахуванням основних положень [51] визначимо як

*if*  $(\tilde{p}^1_j \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } \mu^1_{\tilde{p}_j}(k)) \text{ and } (\tilde{p}^2_j \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } \mu^2_{\tilde{p}_j}(k)) \text{ and}..$   
*and*  $(\tilde{p}_j^{\|\{\tilde{p}_i(in)\}\} \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } \mu^{\|\{\tilde{p}_i(in)\}\}_{\tilde{p}_j}(k)) \text{ then } \tilde{t}_i \text{ is } \mu_{\tilde{t}_i}$   
*if*  $\tilde{t}_i \mu_{\tilde{t}_i}(k) \text{ then } \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_i(out)\} \text{ is } \mu_{\tilde{p}_j}$

$$\begin{aligned} &(\tilde{p}^1_j \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } z^1_{\tilde{p}_j}(k)), (\tilde{p}^2_j \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } z^2_{\tilde{p}_j}(k)), \dots, \\ &(\tilde{p}_j^{\|\{\tilde{p}_i(in)\}\} \in \{\tilde{p}_i(in)\} \text{ is } z^{\|\{\tilde{p}_i(in)\}\}_{\tilde{p}_j}(k)) \\ &\text{-----} \\ &\tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_i(out)\} \text{ is } z_{\tilde{p}_j}(k). \end{aligned} \tag{5.11}$$

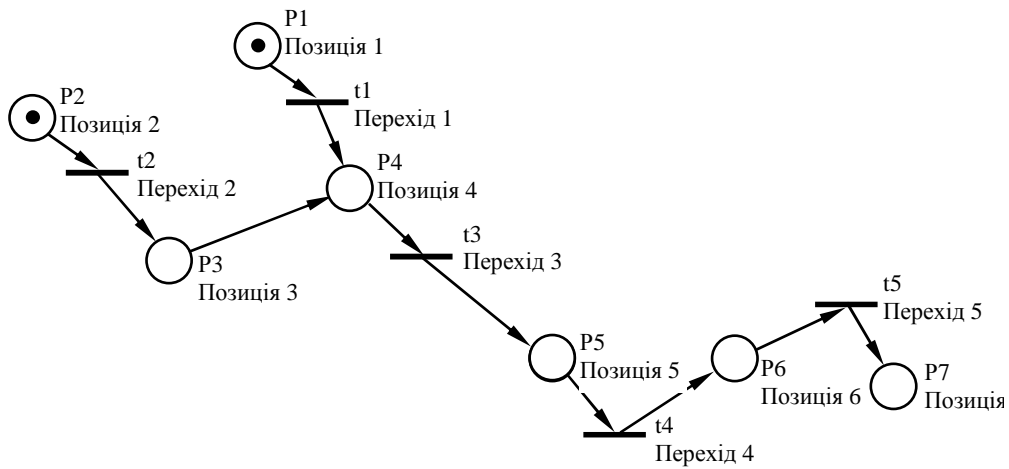


Рис. 5.18 – Фрагмент моделі для моделювання процесів нечіткого логічного виведення

Внаслідок моделювання процедур нечіткого логічного виведення (4.11) і даних ГІС-аналізу формуються рекомендації, що мають вигляд:



**На перетині вулиці XXXX і вулиці YYYY (координати  $X$ ;  $Y$ ) трубопровід низького тиску KKKK перебуває в передаварійній ситуації з упевненістю  $p=p^*$ .**

**Трубопровід розташований на глибині  $S=S^*$ . Умовний діаметр  $D_u=D^*$ . Ділянка трубопроводу потребує термінової заміни на довжині**  
$$L=L^*. \quad (5.12)$$

Як результат оцінки технічного стану трубопроводу в ієрархічній системі управління здійснюється комплекс організаційних, організаційно-технічних і технічних заходів із безумовного усунення потенційно небезпечної ситуації.

На рис. 5.20, 5.21 відображені процеси локалізації потенційно небезпечної ситуації.



Рис. 5.20 – Локалізація точки аварії

У ряді випадків виникає необхідність реалізації альтернативних маршрутів постачання газу споживачам з урахуванням їх пріоритетності, а також необхідного тимчасового аварійного відключення. Приклад таких заходів запропонований на рис. 5.20 – 5.22.

Усі наведені рішення засновуються на моделюванні та аналізі простору станів процесів розробленими і інтегрованими програмними засобами HFPN, програмною оболонкою ArcGis 9.1, програмно-технічними засобами Global

Positioning System (GPS) технологій і програмними засобами Adobe Photoshop, Scan Edit, що виконують сервісні функції.

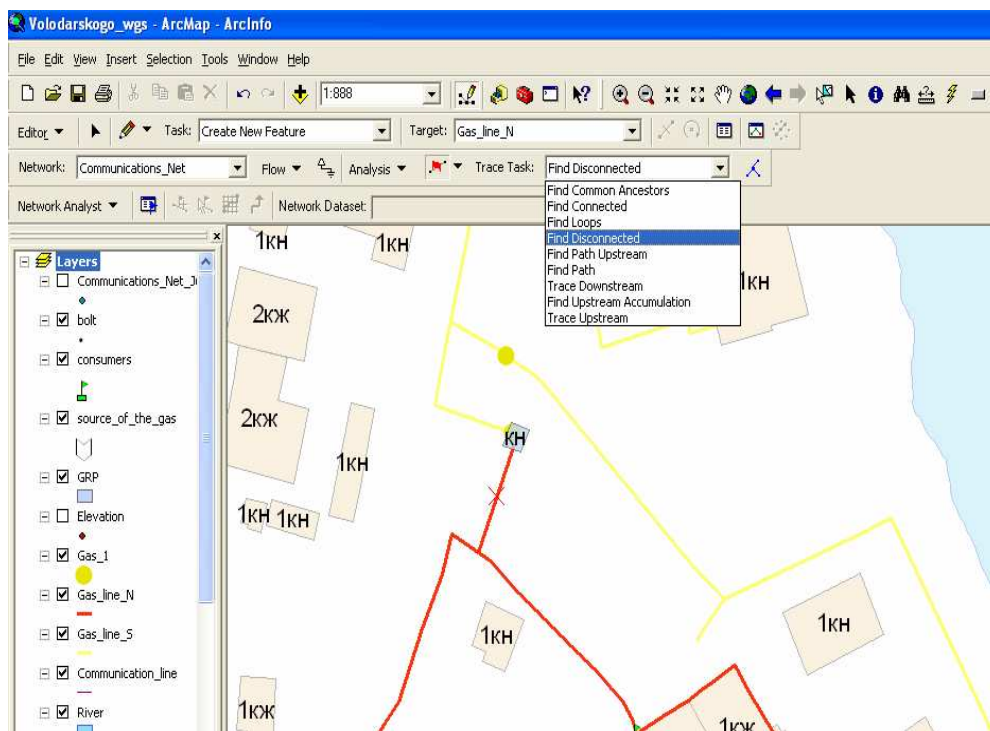


Рис. 5.21 – Локалізація району з потенційно небезпечною ситуацією (позначено «хрестиком»)

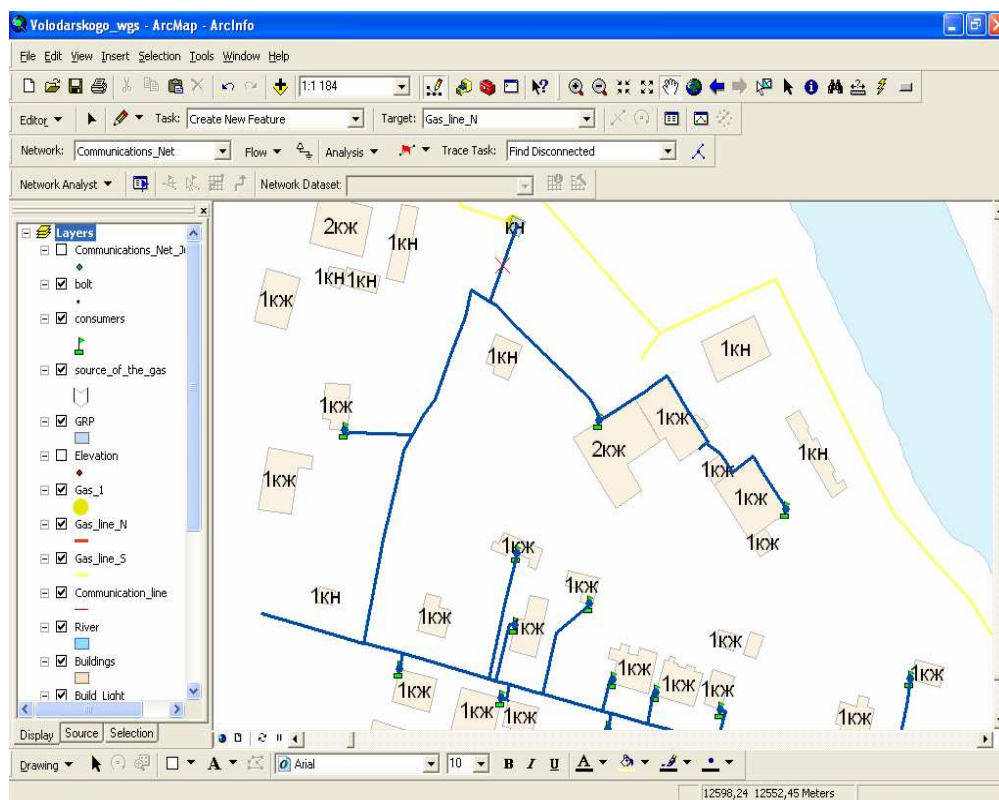


Рис. 5.22 – Відключення ділянки газопостачання об'єктів

Запропонована модифікована методика на основі знання-орієнтованих технологій, моделі та методи реалізовані як приклад в задачах оцінки технічного стану трубопроводів одного з фрагментів газорозподільної системи міста. За даними експертних оцінок впровадження дозволить скоротити терміни планування і виконання робіт з оцінки технічного стану трубопроводів до 15 % і підвищити вірогідність рішень, що приймаються.

## **Висновки до розділу 5**

Відповідно до поставленого в даній роботі комплексу задач, що вирішуються, в розділі розглянуті і вирішені такі задачі:

1. На основі аналізу теоретичних результатів, моделей, методів і підходів до оцінки технічного стану складних технологічних об'єктів запропоновано методичні засоби аналізу і оцінки стану складних технологічних об'єктів, орієнтовані на використання в даній роботі нових методів і моделей. Для цієї мети повною мірою використана нормативна база, особливості предметної області і рішення, які засновані на критичному аналізі існуючих рішень.

2. Для вирішення комплексу теоретичних і практичних задач аналізу і оцінки технічного стану складних ієрархічних об'єктів запропонована структура і функції програмних засобів, яка заснована на інтеграції інструментальних засобів аналізу ієрархічних нечітких мережевих моделей, програмної оболонки реалізації геоінформаційних технологій ArcGis, програмних продуктів реалізації сервісних функцій. Інструментальні засоби HFPN, реалізовані на основі об'єктно-орієнтованих технологій, є подальшим розширенням засобів FPN на процедури моделювання і аналізу ієрархії класів нейро-фаззі мережевих моделей, їх ефективність підтверджена на реальних об'єктах впровадження.

3. Викладені основні практичні результати розв'язання прикладних задач аналізу і оцінки стану складного об'єкта на прикладі аналізу стану трубопроводів газотранспортних і газорозподільних магістралей. У розробці

використані запропоновані в роботі нові методи, моделі, методичні і програмні засоби і існуючі оболонки реалізації геоінформаційних технологій.

4. Результати наукових досліджень впроваджені при виконанні науково-дослідних робіт відповідно до господарської договірної теми «Розробка моделі оцінки технічного стану газопроводів на базі використання програмних інструментальних засобів мережеских моделей» між ВАТ «Харківгаз» і Харківським національним університетом радіоелектроніки. Впровадження дозволило скоротити терміни виконання робіт з оцінки технічного стану газопроводів до 15% і підвищити вірогідність рішень, що приймаються. Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в роботі, були використані у навчальному процесі під час підготовки студентів на кафедрі штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки.

5. Визначено, що ефективним і перспективним напрямом досліджень є подальша адаптація моделей, методів і інструментальних засобів до особливостей широкого класу об'єктів на основі інтелектуалізації геоінформаційних технологій в задачах аналізу стану газотранспортних магістралей.

## ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Створення і дослідження інтелектуальних систем і засобів, методів і моделей на основі нечіткої логіки для аналізу і оцінки стану складних технологічних об'єктів, моделювання процесів прийняття рішень, підвищення їх достовірності на основі комп'ютерної техніки і комп'ютерних технологій нині є одним з пріоритетних напрямів розвитку систем в багатьох галузях людської діяльності.

Останнім часом з'явилося ряд публікацій і повідомлень про проведення авторитетних конференцій і симпозіумів [106, 128 – 131], результати яких підтверджують актуальність і значущість вибраного напрямку і отриманих в роботі результатів. В окремих роботах, з метою розширення технічних можливостей і підвищення достовірності рішень, що приймаються, запропоновані важливі результати по застосуванню гібридних нечітких моделей. Так в повідомленнях [47, 48], з метою аналізу і оцінки технічного стану розподілених об'єктів запропоновано підходи, в яких на основі нечітких моделей і знань в середовищі ГІС розглядаються окремі питання вирішення прикладних задач за темою досліджень. У дослідженнях запропоновані переважно тільки постановки задач, загальні описи і підходи.

Вказані матеріали часто носять загальний, постановочний характер, не охоплюють множину діючих чинників, ієрархії і розподіленості процесів і об'єктів, а також не задовольняють вимогам оперативності вирішення прикладних задач.

Критичний аналіз цих і деяких інших, а також раніше опублікованих, близьких за тематикою науково-технічних праць [19, 29, 30, 43, 45, 48], стан питання по суті досліджень, якість досліджень даної роботи дозволяє зробити висновок, що отримані результати мають важливе наукове і практичне значення для геоінформатики, побудови ефективних методів і моделей процесів на основі нечіткої логіки, підвищення їх достовірності в уже існуючих системах і об'єктах, що створюються, мають переваги над аналогами.

У роботі, відповідно до поставленої мети і задач, наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, яка полягає в розробці методів і математичних мережових моделей на основі нечіткої логіки для аналізу і оцінки стану складних об'єктів. У порівнянні з існуючими методами і моделями, отримані наукові та практичні результати дозволяють моделювати, аналізувати і оцінювати простір станів складних об'єктів, нечіткі процеси в яких представлені на ієрархічних рівнях на множині відношень «умова–дія». Отримані результати мають важливе наукове і практичне значення для побудови інтелектуальних технологій та засобів прийняття рішень про стан складних технологічних об'єктів.

У відповідності до сформульованої проблеми в роботі запропоновано, вирішено та розглянуто такі наукові задачі:

- виконано аналітичний огляд проблеми аналізу простору станів складних об'єктів, процеси в яких представлені на ієрархічних рівнях на множині відношень «умова–дія». Визначено, що процеси можуть бути розподілені просторово в нечіткому просторі станів, вони мало досліджені, вимагають для їх аналізу розробки нових моделей і методів розв'язання теоретичних і практичних задач. Сформульована постановка задачі досліджень, спрямованих на вирішення комплексу взаємопов'язаних теоретичних і практичних питань аналізу і оцінки технічного стану складних просторово розподілених об'єктів;

- уперше запропоновано та обгрунтовано мережеві математичні моделі процесів аналізу простору станів складних об'єктів, які використовують ієрархію розширених кольорових інтегрованих нечітких мереж Петрі, засоби синхронізації на основі кольорових інгібіторних дуг, механізми управління міжрівневими зв'язками прямої і зворотної дії, що дозволяє підвищити ефективність оцінки ієрархії нечітких процесів, взаємодіючих на множині відношень «умова–дія»;

- уперше запропоновано й обгрунтовано новий метод аналізу простору станів і виявлення властивостей досяжності та несуперечності при взаємодії нечітких ієрархічних процесів. Метод включає прямий і зворотний покроковий

цілеспрямований аналіз нечіткого простору станів і структури моделі з урахуванням критеріїв досяжності і несуперечності, що дозволяє скоротити часові та ресурсні витрати з одночасним підвищенням достовірності виявлення, локалізації й усунення відповідних неадекватностей;

- отримав подальший розвиток метод аналізу простору станів при взаємодії процесів в задачах вибору альтернатив складних об'єктів, який відрізняється від існуючих додатковим формуванням компонент, що відображають ієрархічність, просторові характеристики і синхронізацію для нечітких динамічних об'єктів. Метод дозволяє знизити витрати ресурсів під час розв'язання задач аналізу і оцінки технічного стану об'єктів і процесів на множині відношень «умова-дія». Це дозволяє при зменшенні ресурсних витрат ефективно вирішувати багато взаємопов'язаних теоретичних і практичних задач моделювання і аналізу простору станів складних систем;

- отримав подальший розвиток метод бінарного пошуку настроювання функції належності на основі багатозначної логіки, який відрізняється від існуючих тим, що реалізує багатозначну логіку настроювання параметрів функції належності та заданням необхідної точності підбору параметрів і необхідної швидкодії. В результаті проведеної модифікації було покращено швидкість збігу запропонованого раніше алгоритму підбору параметрів нечітких функцій належності введенням ранжування показників настроювання та оптимізації часової складності при зміні коефіцієнта поділу бінарного пошуку;

- для вирішення практичних задач запропоновано та обгрунтовано: алгоритмічні засоби моделювання, аналізу й оцінки простору станів нечітких процесів мережевими моделями на основі ієрархії класів нейро-фаззи мереж Петрі і нових методів. Запропонований алгоритм є розширенням алгоритму побудови дерева досяжності на мережах Петрі; включає структуру і функції інструментальних засобів вирішення прикладних задач аналізу простору станів складних технологічних об'єктів і підтримки прийняття рішень. Ефективність

теоретичних і практичних положень даної роботи підтверджена під час впровадження розробок на реальному об'єкті;

- результати наукових досліджень впроваджені при виконанні науково-дослідних робіт відповідно до господарських договірних тем Харківського національного університету радіоелектроніки, Харківської національної академії міського господарства. Впровадження дозволило скоротити терміни виконання робіт з оцінки технічних станів газопроводів та міських територій до 15% і підвищити вірогідність рішень, що приймаються. Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в роботі, були використані у навчальному процесі підготовки фахівців кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки і кафедри геоінформаційних систем та геодезії Харківської національної академії міського господарства;

- результати теоретичних і практичних досліджень доцільно розвивати і використовувати в наукових і науково-технічних розробках і впровадженнях в інтелектуальних засобах управління і обробки даних і знань складних об'єктів;

- результати досліджень можуть бути корисними фахівцям в галузі моделювання, аналізу та проектування великомасштабних геоінформаційних систем та систем керування, обробки даних та знань у промисловості, бізнесі, енергетиці, екології з застосуванням моделей, методів та технологій обчислювального інтелекту та студентів і аспірантів вищих навчальних закладів України спеціальностей напрямів комп'ютерних наук, програмної інженерії, комп'ютерної інженерії та управління, геодезії, геоінформатики та суміжних спеціальностей.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глушков В. М. Введение в АСУ / В. М. Глушков. – М. : Наука, 1984. – 346 с.
2. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир. – М. : Радио и связь, 1990. – 544 с.
3. Домарацкий А. Н. Системное проектирование интегрированных производственных комплексов / А. Н. Домарацкий, А. А. Лескин, В. М. Пономарев и др. ; под общ. ред. В. М. Пономарева. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 319 с.
4. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 399 с.
5. Солодовников В. В. Принцип сложности в теории управления: о проектировании технически оптимальных систем и о проблеме корректности / В. В. Солодовников, В. Ф. Бирюков, В. И. Тумаркин. – М. : Наука, 1977. – 344 с.
6. Zadeh L. A. Fuzzy sets and systems / L. A. Zadeh // Proc. Symp. Syst. Theory Polytech. Inst. – Brooklyn, 1965. – P. 29 – 37.
7. Борисов А. Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркульева и др. – М. : Радио и связь, 1989. – 304 с.
8. Пospelов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Пospelов. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 232 с.
9. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний : монография / А. Е. Алтунин, Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Вінниця : Універсам–Вінниця, 2002. – 145 с.
10. Вейцман К. Распределенные системы мини – и микроЭВМ / К. Вейцман ; под ред. Г. П. Васильева. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 362 с.
11. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : Мир, 1976. – 344 с.

12. Дмитриев А. К. Основы теории построения и контроля сложных систем / А. К. Дмитриев, П. А. Мальцев. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. – 192 с.
13. Глушков В. М. Моделирование развивающихся систем / В. М. Глушков, В. В. Иванов, В. М. Яненко. – М. : Наука. Гл. ред. физ. - мат. лит., 1983. – 350 с.
14. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А Кофман; пер. с франц. – М. : Радио и связь, 1982. – 432с.
15. Асаи К. Прикладные нечеткие системы / под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно; пер. с яп.. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
16. Pedrycz W. Fuzzy models: methodology, design, applications and challenges // Fuzzy modelling paradigms and practice / Ed. by W. Pedrycz. – Boston / Dordrecht / London, 1996. – P. 3 – 22.
17. Hwang I. Hybrid neuro-fuzzy approach to the generation of measuring points for knowledge-based inspection planning [Electronic resource] / I. Hwang, H. Lee, S. Ha // International Journal of Production Research. – Taylor and Francis Ltd ,2002. – V. 40. – 1. – P. 2507–2520. – Regime of access : <http://www.ingentaconnect.com/content/tandf/tpers/2002/00000040/00000011/art00004>.
18. Liu K. F. R. FPNES: fuzzy Petri net based expert system for bridges damage assessmntnt [Electronic resource] / K. F. R. Liu, J. Lee, W. Chiang, S.J. Yang // Tools with Artificial Intelligence, Proceedings. Tenth IEEE International Conference (10–12 Nov 1998), Taipei, Taiwan . – Taipei, Taiwan, 2002. – P. 302 – 309. – Regime of access : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=744858&isnumber=16054>.
19. Stathacopoulou R. Neural network-based fuzzy modeling of the student in intelligent tutoring systems [Electronic resource] / R. Stathacopoulou, G. D. Magoulas, M. Grigoriadou // Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks. – Washington, CD-ROMProceedings, IEEE Catalog Number: 99CH36339C, 1999. – Regime of access : <http://www.dcs.bbk.ac.uk/~gmagoulas/JCNN0679.PDF>.

20. Porwal A. Hybrid neuro–fuzzy model for mineral potential mappings [Electronic resource] / A. Porwal, E. J. M. Carranza, M. A. Hale // International Institute for Geo–Information Science and Earth Observation (ITC), Hengelosestraat 99, P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, PAYS–BAS. – Regime of access : <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16178956>.

21. Hybrid Petri Net Representation of Gene Regulatory Network [Electronic resource] / H. Matsuno, A. Doi, M. Nagasaki, S. Miyano // Pacific Symposium on Biocomputing, 2000. – 2000. – 12 p. – Regime of access : <http://helix-web.stanford.edu/psb00/matsuno.pdf>.

22. Troncale S. Modeling and Simulation with Hybrid Functional Petri Nets of the Role of Interleukin–6 in Human Early Haematopoiesis [Electronic resource] / S. Troncale, F. Tahi // Pacific Symposium on Biocomputing (2006). – 2006. – 13 p. – Regime of access : <http://helix-web.stanford.edu/psb06/troncale.pdf>.

23. David R. On Hybrid Petri Nets [Electronic resource] / R. David, H. Alla // Discrete event dynamic systems: Theory and applications. – Springer Netherlands, 2001. – V. 11. – 1–2. – P. 9 – 40. – Regime of access : <http://www.springerlink.com/content/13k132145p137175/>.

24. Wu X.–Q. An Intelligent Petri Nets Model Based on Competitive Neural Network [Electronic resource] / X.–Q. Wu. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. – P. 338 – 397. – Regime of access : <http://www.springerlink.com/content/14584q832m003336/?p=1b4a605297b54ae48e243b49f8ab8304&pi=38>.

25. Chen S.–M. Knowledge representation using fuzzy Petri nets [Electronic resource] / S.–M. Chen, J.–S. Ke, J.–F. Chang // Knowledge and Data Engineering. – 1990. – V. 2. – 3. – P. 311 – 319. – Regime of access : <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/ielx5/69/2214/00060794.pdf?tp=>.

26. Мидзумото М. Нечеткое рассуждение с нечетким условным высказыванием вида «если...то...иначе» / М. Мидзумото // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / под ред. Р. Р. Ягера; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 143 – 153.

27. Эрнст К. Дж. Один подход к экспертным системам управления с использованием нечеткой логики / Эрнст К. Дж. // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: / под ред. Р. Р. Ягера; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 133 – 143.

28. Racocanu D. Fuzzy Petri nets for monitoring and recovery [Electronic resource] / D. Racocanu, E. Minca, N. Zehouni // Robotics and Automation, Proceedings ICRA'03. IEEE International Conference, 14–19 Sept. 2003. – 2003. – V. 3. – 4318 – 4323. – Regime of access : [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?tp=&arnumber=1242268&isnumber=27835](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?tp=&arnumber=1242268&isnumber=27835).

29. Garg M.L. A fuzzy Petri net for knowledge representation and reasoning [Electronic resource] / M.L. Garg, S.I. Ahson, P.V. Gupta // Information Processing Letters. – 1991. – V. 39. – 3. – P. 1265 – 171. – Regime of access : <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=117625&dl=GUIDE&coll=GUIDE&CFID=22384847&CFTOKEN=44821070>.

30. A Fuzzy Approach for Discrete Event Systems Recovery [Electronic resource] / E. Minca, D. Racocanu, Fl. Dragomir, N. Zerhouni. – 6 p. – Regime of access : [http://www.onco-media.com/documents/Publications\\_DR/International\\_Conferences/minca2007mcpl.pdf](http://www.onco-media.com/documents/Publications_DR/International_Conferences/minca2007mcpl.pdf).

31. Koriem S.M. A fuzzy Petri net tool for modeling and verification of knowledge – based systems / S.M. Koriem // The Computer Journal. – 2000. V. – 43. – № 3. – P. 206 – 223.

32. Looney C. Fuzzy Petri nets for rule– based decision making / C. Looney // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 1988. – V. – 18. – № 1. – P. 178 – 183.

33. Fuzzy – timing high–level Petri nets (FTHNs) for time critical systems / T. Murata, T. Susuki, S.M. Shatz, J. Caroso, H. Camango (eds) “Fuzziness in Petri nets” in the series “Studies in Fuzziness and Soft Computing”. – New York : Springer Verlag, 1999. – 22. – P. 88 – 114.

34. Learning Petri network and its application to nonlinear system control / K. Hirasawa, M. Ohbayashi, S. Sakai, J. Hu // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics – Part B. – Cybernetics. – 1998. – V. – 28. – № 6. – P. 781 – 789.

35. Ovchinnikov A.L. Correlation leak detector control of underwater pipeline leakproofness [Electronic resource] / A.L. Ovchinnikov, B.M. Lapchin // 17 th World Conference on Nondestructive Testing, 25 – 28 Oct. 2008. – Shanghai, China, 2008. – 7 p. – Regime of access : [http://www.ultrasonic.de/article /wcndt2008/papers/545.pdf](http://www.ultrasonic.de/article/wcndt2008/papers/545.pdf) . – Загл. с экрана.

36. Borisocheva K. Analysis of the Oil– and Gas–Pipeline–Links between EU and Russia [Electronic resource] / K. Borisocheva // Centre for Russia and Eurasia, Athens, Greece. – 2007. – 25 p. – Regime of access : <http://www.cere.gr/upload/Russia%20EU%20Oil%20and%20Gas%20Pipeline%20politics.pdf>.

37. Козаченко Т. І. Методи моделювання і моделі в геоінформаційному картографуванні / Т. І. Козаченко // Вісник геодезії та картографії. – 2008. – № 3 (54). – С. 11 – 18.

38. Митчел Э. Руководство по ГИС–анализу Ч. 1. Модели пространственного распределения и взаимосвязи / Э. Митчел. – К. : ЗАО ЕКОММСо, 2000. – 179 с.

39. Козаченко Т. І. Інтеграція функцій картографічного моделювання і ГИС–аналізу в геоінформаційних системах при суспільно–географічних дослідженнях / Т. І. Козаченко // Укр. геогр. журн. – 2004. – № 3. – С. 99 – 108.

40. Геоинформатика / А. Д. Иванников, В. П. Кулагин, А. Н. Тихонов, В. Я. Цветков. – М. : МАКС – Пресс, 2001. – 349 с.

41. Ищук А. А. Возможности пространственного моделирования в ГИС интегрированной стоимости проектируемых коммуникаций [Электронный ресурс] / А. А. Ищук, В. Г. Швайко, А. С. Курбацкий. – ArcReview, 2005. – Вып. №1(32) . – Режим доступа : [http://www.dataplus.ru/Arcrev/Number\\_32/13\\_Ischuk.htm](http://www.dataplus.ru/Arcrev/Number_32/13_Ischuk.htm).

42. Корсей С. Г. ГИС – технологии в трубопроводном транспорте / С. Г. Корсей, Н. Б. Дьякова // ArcReview. – М. : ДАТА+, 2002. – № 2(21). – С. 17 – 18.

43. Кутуков С. Е. Элементы искусственного интеллекта в системах сбора, подготовки и транспорта углеводородного сырья [Электронный ресурс] / С. Е. Кутуков, В. И. Васильев // Транспорт, хранение и распределение – электронный архив журнала «Нефтегазовое дело». – 2005. – 5 с. – Режим доступа : <http://www.ogbus.ru/authors/Kutukov/kut5.pdf>.

44. Modeling and querying fuzzy spatiotemporal databases [Electronic resource] / A. Sözer, A. Yazıcı, H. Oğuztüzün, O. Taş // Information Sciences: an International Journal archive. – New York: Elsevier Science Inc., 2008. – V. 178. – 19. – P. 3665–3682. – Regime of access : <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1399650.1399844&coll=GUIDE&dl=ACM>.

45. Claramunt C. Fuzzy semantics for direction relations between composite regions / C. Claramunt, M. Thériault // Information Sciences—Informatics and Computer Science: An International Journal. – 2004. – v. 160. – 14. – P. 73 – 90.

46. Evaluating structural and topological consistency of complex regions with broad boundaries in multi-resolution spatial databases /S. Du, O. Qin, Wang O. Qiao, H. Ma // Information Sciences: an International Journal. - 2008. – v. 178. - 1. - P. 52 - 68.

47. Koyuncu M. IFOOD : An Intelligent Fuzzy Object–Oriented Database Architecture / M. Koyuncu, A. Yazici // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2003. – v. 15. – 5. – P. 1137 – 1154.

48. Schneider M. A Design of Topological Predicates for Complex Crisp and Fuzzy Regions / M. A. Schneider // Proc. of the 20th International Conference on Conceptual Modeling: Conceptual Modeling (November 27–30, 2001). – 2001. – P. 103 – 116.

49. Murata T. Temporal uncertainty and fuzzy-timing high-level Petri nets / T. Murata // Proc. 17th Int. Conf. of Application and Theory of PNs, Osaka, Japan, June 26 / IEEE Computer Society Press. – Los Alamitos, CA, 1996.– P. 11–28.

50. Pedrycz W. A generalized fuzzy Petri net model / W. Pedrycz, F. Gomide // IEEE Trans. on Fuzzy System. – 1994. – 2. – № 4. – P. 295 – 301.

51. Бодянский Е.В. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем : монографія / Е. В. Бодянский, Е. И. Кучеренко, А. И. Михалев. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2005. – 311 с.
52. Koriem S. M. A fuzzy Petri net tool for modeling and verification of knowledge – Based Systems / S. M. Koriem // The Computer Journal. – 2000. – 43. – № 3. – P. 206 – 223.
53. Кучеренко Е. И. Гибридные математические модели на основе расширений нечетких сетей Петри / Е. И. Кучеренко, Д. Е. Краснокутский // Бионика интеллекта. – 2007. – № 1 (66). – С. 64 – 67.
54. Кучеренко Е. И. Расширение математических моделей на основе классов интегрированных фаззи сетей Петри в задачах управления технологическими комплексами / Е. И. Кучеренко, Д. Е. Краснокутский // Сложные системы управления и менеджмент качества CCSQM'2007 : материалы междунар. науч. конф. – Старый Оскол, 2007. – С. 81 – 83.
55. Руденко О. Г. Основы теории искусственных нейронных сетей / О. Г. Руденко, Е. В. Бодянский. – Х. : Телетех, 2002. – 317 с.
56. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с пол. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
57. Люгер Д. Ф. Искусственный интеллект. Стратегия и методы решения сложных проблем = Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving / Д.Ф. Люггер; пер. с англ : – 4 изд. – М. ; СПб. ; К. : Изд. дом «Вильямс», 2005. – 864 с.
58. Солодовников В. В. Теория сложности и проектирование систем управления / В. В. Солодовников, В. И. Тумаркин. – М. : Наука, 1990. – 162 с.
59. Кучеренко Е. И. Об одном подходе к построению нечетких гибридных моделей сложных систем / Е. И. Кучеренко, Д. Е. Краснокутский // Системи обробки інформації. – 2007. - Вип. 9 (67). - С. 58 - 62.

60. Кучеренко, Е. И. Моделирование процессов принятия решений в производствах с использованием интеллектуальных технологий / Е. И. Кучеренко, Д. Е. Краснокутский // Теория и техника передачи, приема и обработки информации : сб. тез. докл. междунар. науч. конф. – Х. : ХНУРЭ, 2004. – Ч. 2. – С. 56 – 57.

61. Краснокутский Д. Е. К вопросу моделирования процессов принятия решений в производственных системах на основе иерархии классов нейрофаззи сетей Петри / Д. Е. Краснокутский // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст. : зб. матеріалів 9-го молодіжного форуму. – Х. : ХНУРЕ, 2005. – С. 456.

62. Rokyta P. Electronic system design automation using high level Petri nets / P. Rokyta, W. Fengler, T. Hummel // Workshop for Hardware Design and Petri Nets, Lisboa, June 22 – 26, 1998. – P. 129 – 138.

63. Мурата Т. Сети Петри: свойства, анализ, приложения / Т. Мурата // ТИИЭР, апрель 1989 г. – Вып. 77(4). – С. 41 – 85.

64. Кучеренко Е. И. К проблеме анализа достижимости принимаемых решений / Е. И. Кучеренко // АСУ и приборы автоматики. – Х. : 2001. – Вып. 114. – С. 11 – 16.

65. Кучеренко Е. И. К вопросу о непротиворечивости принимаемых решений в нечетких условиях функционирования объектов анализа / Е. И. Кучеренко // АСУ и приборы автоматики. Х. : 2000. - Вып. 113. - С. 75 - 81.

66. Кучеренко Е. И. О модификации нечетких сетевых моделей при решении одного класса задач / Е. И. Кучеренко // АСУ и приборы автоматики. Х. : 2002. – Вып. 118. – С. 105 – 110.

67. Кучеренко Е. И. Методы анализа процессов принятия решений в нечетком пространстве состояний объектов на основе иерархии сетевых моделей / Е. И. Кучеренко, Д. Е. Краснокутский // Збірник наукових праць ХУПС. – Х. : ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2008. – Вип. 1 (16). – С. 75 – 80.



68. Кучеренко Е. И. Применение методов на основе сетевых моделей в задачах анализа состояния сложных технологических объектов / Е. И. Кучеренко, Д. Е. Краснокутский // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 558 – 567.

69. Краснокутский Д. Е. Методы принятия решений с использованием расширений интегрированных классов нечетких сетевых моделей / Д. Е. Краснокутский // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст. : зб. матеріалів 10-го ювілейного молодіжного форуму. – Х. : ХНУРЕ. 2006. – С. 319.

70. Кучеренко Е. И. Инструментальные средства моделирования процессов принятия решений на основе нечетких сетевых моделей / Е. И. Кучеренко, Д. Е. Краснокутский // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ - 2008 : материалы междунар. науч.-техн. конф., 22 - 27 сентября 2008 г. - Донецк ; Таганрог ; Минск, 2008. - Т. 2. - С. 248 - 251.

71. Кучеренко Е. И. Инструментальные средства моделирования процессов управления технологическими комплексами машиностроения / Е. И. Кучеренко, В. А. Фадеев // Авиационно–космическая техника и технология. Труды государственного аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х. : Государственный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2000. – Вып. 14. – С. 166 – 168.

72. Tsoukalas L. H. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering / L. H. Tsoukalas, R. E. Uhrig. – New York : John Wiley&Sons. Inc, 1997. – 587 p.

73. Кучеренко Е. И. Об одном методе анализа взаимодействующих процессов на нечетких сетевых моделях / Е. И. Кучеренко // АСУ и приборы автоматики. – 2001. – Вып. 116. – С. 4 – 13.

74. Моисеев Н. Н. Методы оптимизации / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванилов, Е. М. Столярова. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 352 с.

75. Шаталов А. С. Отображение процессов управления в пространствах состояний / А. С. Шаталов – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

76. Миркин Б. Г. Проблема группового выбора / Б. Г. Миркин – М. : Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1974. – 256 с.

77. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Питерсон Дж.; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 264 с.

78. Эйлер М. Моделирование нашего мира: руководство ESRI по проектированию базы геоданных / М. Эйлер, Майкл; пер. с англ. – М. : Дата+, 2001. – 255 с.

79. Dave P. System Design Strategies / P. Dave // An ESRI Technical Reference Document. – ESRI, 2006. – 259 p.

80. Новак В. Математические принципы нечеткой логики / И. Перфильева, И. Мочкрож ; пер. с англ. – М. : Физматлит, 2006. – 352 с.

81. Сараев А. Д. Системный анализ и современные информационные технологии / А. Д. Сараев, О. А. Щербина // Труды Крымской Академии наук. – Симферополь: СОНАТ, 2006. – С. 47 – 59.

82. Левин В. И. Интервальная логика и оптимизация в условиях неопределенности / В. И. Левин // Искусственный интеллект. – 2002. – № 3. – С. 611 – 621.

83. Егоров А. С. Логическое моделирование в условиях неопределенности на базе нечетких интервальных сетей Петри / А. С. Егоров, А.Н. Шайкин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2002. – № 2. – С. 134 – 139.

84. Интеллектуальные технологии в задачах принятия решений технологических комплексов на основе нечеткой интервальной логики / Е. И. Кучеренко, В. А. Филатов, И. С. Творошенко, Г. Н. Байдан. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 2. – С. 92 – 96.

85. Кучеренко Е. И. Процессы принятия решений в сложных системах на основе нечетких интервальных представлений / Е. И. Кучеренко, И. С. Творошенко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Тематичний випуск: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ "ХПІ". – 2003. – Т. 1. – № 7. – С. 79 – 86.

86. Творошенко И. С. Структура и функции интеллектуальных средств принятия решений в сложных системах / И. С. Творошенко // Искусственный интеллект. – 2004. – № 4. – С. 462 – 470.

87. Кучеренко Е. И. Прикладные аспекты моделирования нечетких процессов в сложных системах / Е. И. Кучеренко, И. С. Творошенко // Сборник научных трудов ХУВС. – 2010. – Вып. 1 (23). – С. 127 – 131.
88. Журкин И. Г. Геоинформационные системы / И. Г. Журкин, С. В. Шайтура. – М. : «КУДИЦ-ПРЕСС», 2009. – 272 с.
89. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 166 с.
90. Градиентные методы и оптимизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://opds.sut.ru/electronic\\_manuals/pe/f022.htm](http://opds.sut.ru/electronic_manuals/pe/f022.htm).
91. Кучеренко Е. И. О методах настройки функций принадлежности / Е. И. Кучеренко, А. В. Корниловский, И. С. Творошенко. // Системы управления навигации и связи. – 2010. – Вып. 1. – С. 95 – 99.
92. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ru.wikipedia.org/>.
93. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – С. 575 – 576.
94. Шилдт Г. Полный справочник по C++ / Г. Шилдт. – 4-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 800 с.
95. Кучеренко Е. И. О модификации методов оперативной настройки функций принадлежности в знание ориентированных моделях / Е. И. Кучеренко, А. В. Корниловский, И. С. Глушенкова // Системы обработки информации. – 2010. – № 5 (86). – С. 54 – 57.
96. Яхьяева Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Г. Э. Яхьяева. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 316 с.
97. Многозначная логика [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://bse.sci-lib.com/article077262.html>.
98. Кучеренко Е. И. Проблемы моделирования и анализа нечетких процессов управления / Е. И. Кучеренко // Радиоэлектроника и информатика, 2001. – № 2. – С. 118 – 121.

99. Кучеренко Е. И. О методах, моделях и критериях принятия решений в пространственно-распределенных объектах / Е. И. Кучеренко, И. С. Глушенкова // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический випуск: Информатика и моделирование. – Х. : НТУ «ХПИ». – 2009. – № 13. С. 102-107.
100. Кучеренко Е. И. Об информационных технологиях принятия решений в задачах оценки состояния территорий / Е. И. Кучеренко, И. С. Глушенкова // Искусственный интеллект. – 2010. - № 3. С. 489-493.
101. Нейро-фаззи модели и мультиагентные технологии в сложных системах / Е. В. Бодянский, В. Е. Кучеренко, А. И. Михалев, и др. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2008. – 412 с.
102. Бодяньський Є. В. Нейро – фаззі моделі в системах штучного інтелекту / Є. В. Бодяньський, Є. І. Кучеренко. – Х. : ХНУРЕ, 2006. – 177 с.
103. Кучеренко Є. І. Сіткові моделі в задачах аналізу складних систем / Є. І. Кучеренко. – Х. : ХТУРЕ, 1999. – 100 с.
104. ESRI. ArcCatalog : руководство пользователя . – ECCOM, 2003. – 257 с.
105. ESRI. ArcGIS 9. ArcMap : руководство пользователя. – ESRI от Data+, 2004. – 546 с.
106. Adobe Photoshop CS4 : руководство пользователя. – Adobe Systems Inc. – 2008. – 816 с.
107. Руководство пользователя по ГИС «MapInfo». – New York : MapInfo Corporation, Troy, 1993. – 121с.
108. Лафоре Р. Объектно–ориентированное программирование в C++ / Р. Лафоре. – СПб. : Питер, 2004. – 924с.
109. Ватсон К. С# / К. Ватсон. – М. : Лори, 2005. – 861с.
110. Приемы объектно–ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Д. Влиссидес. – СПб. : Питер, 2007. – 367с.
111. С# 2005 и платформа . NET 3.0 для профессионалов / К. Нейгел, Б. Ивѐн, Дж. Глин и др. – ООО И. Д. Вильямс, 2008. – 1376 с.

112. Седак В. С. Компьютерные технологии в разработке и эксплуатации региональных систем газоснабжения на примере ОАО ГГО “ХАРЬКОВГАЗ” / В. С. Седак. – Х. : 1999. – 183 с.

113. Евдокимов А.Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. – Х. : Вища школа, 1980. – 144 с.

114. Алтунин А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях : монография / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин. — Тюмень : ТГУ, 2000. – 352 с.

115. Кудинов Ю. И. Моделирование технологических и экологических процессов / Ю. И. Кудинов, А. Г. Венков, А. Ю. Келина. — Липецк : ЛЭГИ, 2001. – 131 с.

116. Radar Detection and Monitoring of Gas Pipeline Leaks / Natural Gas Infrastructure Reliability Industry Forums [Electronic resource] / S. Goptsam, A. Dron, T. Elmev, P. Raptis, V.D. Asanov // (16 – 17 September 2002 ). – Morgantown, WV, 2002. – 25 p. – Regime of access: <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/naturalgas/1-3.pdf>.

117. Томлинсон Р. Думая о ГИС. Планирование географических информационных систем : руководство для менеджеров / Р. Томлинсон. – М. : Дата+, 2004. – 329 с.

118. Газоснабжение: СНиП 3.05.02–88: утв. Госстрой СССР 17.03.88: ввод в действие с 01.07.87. – М. :Госстрой СССР, 1987.

119. ГОСТ 23667–85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров. – Введ. 1987-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 19 с.

120. ГОСТ 17410–78. Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Методы ультразвуковой дефектоскопии. Введ. 1980-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 35 с.

121. Серапинас Б. Б. GPS. Глобальные системы позиционирования / Б. Б. Серапинас. – М. : ИКФ Каталог, 2002. – 106 с.

122. Найман В. С. GPS–навигаторы для путешественников, автомобилистов, яхтсменов / В. С. Найман. – М. : НТ Пресс, 2008. – 400 с.

123. Гаврилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб. : Питер, 2000. – 384 с.

124. Gajic Z. Modern Control Systems Engineering: With MATLAB Laboratory Experiments / Z. Gajic, M. Lelić. – University of Michigan, 2007. – 495 p.

125. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения [Текст] / под ред. Р. Р. Ягера. – М. : Радио и связь, 1986. – 408 с.

126. Фу К. С. Применение нечетких множеств для оценки устойчивости строительных конструкций при землетрясениях / К. С. Фу, М. Исидзука, Дз. Т. П. Яо // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / под ред. Р. Р. Ягера. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 312 – 332.

127. Кучеренко Е. И. Информационная технология анализа технического состояния трубопроводов газотранспортных и газораспределительных сетей / Е. И. Кучеренко, А. А. Евдокимов, Д. Е. Краснокутский / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/2(38). – С. 32–37.

128. Liu M. Fast leak detection and location of gas pipelines based on adaptive particle filter [Electronic resource] / M. Liu, S. Zang, D. Zhou // Int. Appl. Math. Comput. Sci. – 2005. – V. 15. – 4. – P. 541 – 550. – Regime of access : <http://matwbn.icm.edu.pl/ksiazki/amc/amc15/amc15411.pdf>.

129. Delavar M.R. Pipeline Routing Using Geospatial Information System Analysis (IRAN) [Electronic resource] / M.R. Delavar, F. Nagibi – 11 p. – Regime of access : <http://www.scangis.org/scangis2003/papers/12.pdf>.

130. NASTEC'2008 Conference Themes (August 13–15 2008) – Montreal: McGill University. 2008. [Electronic resource]. – Regime of access : <http://www.eurosis.org/cms/index.php?q=node/749>.

131. Villani E. Modelling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems A Petri Net Approach [Electronic resource] / E. Villani, P.O. Miyagi, R. Valette. – Springer; 2006. – 246 p. – Regime of access : [http://www.ebookonline.net/Modelling-and-Analysis-of-Hybrid-Supervisory-Systems-A-Petri-Net-Approach\\_143429.html](http://www.ebookonline.net/Modelling-and-Analysis-of-Hybrid-Supervisory-Systems-A-Petri-Net-Approach_143429.html).

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

КУЧЕРЕНКО ЄВГЕН ІВАНОВИЧ  
КРАСНОКУТСЬКИЙ ДМИТРО ЄВГЕНІЙОВИЧ  
ГЛУШЕНКОВА ІРИНА СЕРГІЇВНА

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНКИ  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Монографія

Відповідальний за випуск *І. М. Патракеєв*

Науковий редактор *Є. В. Бодянський*  
Комп'ютерний набір *І. С. Глушенкова*  
Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*  
Дизайн обкладинки *Т. Є. Клочко*

Підп. до друку 23.02.2011  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60x84 1/16  
Ум. друк. арк. 7,1  
Тираж 500 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК №731 від 19.12.2001